

Institute for Laser Science
University of Electro-Communications
Annual Report 2020

年次報告書(令和2年度)



国立大学法人 電気通信大学
レーザー新世代研究センター

ご挨拶

センター長 中川賢一

昨年来のコロナウイルスの世界的な感染拡大により、1 年以上に渡って人の接触および移動が大きく制限されることを余儀なくされ、大学における研究教育活動も大きな影響を受け、今までとは異なる対応を模索してきました。しかしこのような中でも研究および教育を絶やすことなく維持するため、オンラインでの講義や学会などの取組みが大きく発展し、新しい教育や研究のスタイルが生まれるきっかけともなりました。このコロナ禍によって研究教育活動が大きく制限されましたが、これをきっかけに今までの研究および教育活動を見直して、これを克服するための新しい方向を開拓する機会ととらえることもできます。レーザー新世代研究センターは、40 年以上に渡ってレーザーを中心に基礎科学から産業や先端技術に渡る幅広い研究を行ってきました。このコロナ禍の中、新しい研究の方向として、電通大の学内の生体・医療研究の分野の研究者と連携してバイオフィotonics分野の研究開発を 2020 年よりスタートしました。ポストコロナ社会においては、医療技術が増々重要なものとなる事が予想され、レーザー技術の重要な応用研究としてこれから大きく発展させていきたいと考えています。新しい研究動向を注視して将来の科学技術の種となる基礎研究にいち早く取り組みながら、一方では長期的な視点に立って重要なテーマに継続して取り組むことも必要で、今後もこの両方の取組みを続けていきたいと考えています。多くの皆さんと一緒に知恵を絞ってこの世界的な難局を乗り越え、将来の科学技術を切り拓いていきたいと考えております。今後とも当センターの研究教育活動に対して皆様のご理解およびご支援をよろしくお願いいたします。

令和 3 年 11 月 22 日

目次

1. センターの概要	3
1.1 構成員	3
1.2 研究グループの研究概要	4
1.3 教育・人材育成活動	4
2. 令和2年度の研究活動報告	5
2.1 米田仁紀 研究室	5
2.2 西岡 一 研究室	9
2.3 白川 晃 研究室	11
2.4 武者 満 研究室	13
2.5 戸倉川 正樹 研究室	15
2.6 中川 賢一 研究室	17
2.7 丹治 はるか 研究室	19
2.8 森永 実 研究室	22
2.9 岩國 加奈 研究室	24
2.10 中村 信行 研究室	26
3. 外部発表のリスト (2020年4月～2021年3月)	28
3.1 論文発表	28
3.2 国際会議プロシーディングス	28
3.3 解説論文、紹介記事、報告書等	28
3.4 博士論文、修士論文、卒業論文	29
3.5 国際会議 発表	30
3.6 国内会議 発表	31
3.7 表彰	35

1. センターの概要

1.1 構成員

①レーザーグループ

米田 仁紀 教授 副センター長

西岡 一 教授 兼任

白川 晃 教授

武者 満 准教授

戸倉川 正樹 准教授

②原子光学・量子光学グループ

中川 賢一 教授 センター長

丹治 はるか 准教授

森永 実 准教授

岩國 加奈 助教

③多価イオングループ

中村 信行 教授

客員教授

柳谷 高公 (神島化学工業(株))

川嶋 利幸 (浜松ホトニクス(株))

1.2 研究グループの研究概要

① レーザーグループ（米田、西岡、武者、白川、戸倉川）

レーザーグループでは、中赤外から X 線に渡る広い波長範囲のレーザーや、周波数高安定レーザーから超広帯域・超短パルスレーザーなどの極限的な性能を持ったレーザーの開発と、これらのレーザーの様々な光科学の分野への応用研究を行っている。以下に現在取り組んでいる研究テーマを記す。

- (1) 光周波数コムと周波数安定化レーザーを用いた広帯域光周波数基準光源の開発
- (2) セラミックレーザーおよびファイバーレーザーを用いた高熱付加、高強度レーザーの開発
- (3) ハード X 線領域のレーザー
- (4) 赤外領域 ($2\mu\text{m}$) の超短パルスレーザーの開発

② 原子光学・量子光学グループ（中川、丹治、森永、岩國）

原子光学・量子光学グループでは、レーザー冷却によって得られる極低温原子を用いた原子光学および量子光学の研究と、高精度なレーザー制御技術を用いた精密分子分光の研究を行っている。以下に現在取り組んでいる主な研究テーマを記す。

- (1) 冷却原子を用いた量子多体系の量子シミュレーターの開発
- (2) 原子干渉計を用いた重力加速度計の開発
- (3) 共振器中の冷却原子を用いた量子光源の開発
- (4) 光周波数コムを用いた精密分子分光

③ 多価イオングループ（中村）

多価イオングループでは、電子ビームイオントラップを用いて多数の電子が剥ぎ取られた多価イオンを生成し、この多価イオンの性質の解明およびその様々な分野への応用研究を行っている。以下に現在取り組んでいる主な研究テーマを記す。

- (1) 重元素多価イオンの電子状態・相互作用における相対論効果の研究
- (2) 太陽コロナや熱核融合実験炉の高温プラズマ診断のための分光データ取得
- (3) 多価イオンを用いた高精度原子時計の開発

1.3 教育・人材育成活動

当センターでは、光科学の分野の様々な研究活動と同時にこの分野を学ぶ学生の教育の支援や人材育成活動に取り組んでいる。以下にその主な活動を示す。

(1) 大学院教育プログラム Elementary Teaching Laboratory (ETL)

大学院生による学部学生に対するレーザー実験の実習プログラム

(2) 多摩コロキウム

東京農工大学、電気通信大学、東京外語大学の 3 大学共同合宿セミナー

(3) レーザー夏の学校

レーザー学会主催のレーザー夏の学校における実験実習プログラム

2 令和2年度の研究活動報告

2.1 米田 仁紀 研究室

1. 概要

ここではハード X 線から遠赤外レーザーまでを使ったレーザー開発、レーザー科学実験、レーザー応用を研究している。研究は、本学レーザーセンター内の実験室だけでなく、SPRING-8, SACLAR X 線自由電子レーザー施設、大阪大学レーザーエネルギー学研究所、J-PARC など様々な施設を利用した研究も行っている。また、国内の大型プロジェクトとしてサイバー空間と実空間を結ぶレーザー加工の研究、ハード X 線を用いたレーザー加工の研究、レーザー駆動加速器の研究なども行っている。

以下では、これら研究の中で特徴的な成果などについてまとめている。

2. 研究活動報告

2.1 ハードX線コヒーレントフォトンクス研究

兵庫県播磨にある世界有数のX線自由電子レーザー（XFEL）を使い、高コヒーレンスなハードX線の制御研究を行っている。具体的には、Cu原子の内殻励起K α 線遷移を使い、結晶構造を利用して発振波長制御を行う研究を推進している。これまで実験としては、180度Bragg回折共鳴結晶をもとに、自然幅よりも狭窄化された1.5オングストロームのレーザー発振を達成し、その波長制御手法を探索している。一方で、このレーザーの動作を説明できる計算機モデルおよびシミュレーションの開発を行っている。ここでは、1フェムト秒程度の遷移寿命の中で 10^{18} Hzの波が干渉しながら増幅するモデルとなっており、最近ようやく実験のスペクトルを再現できるようになってきた。これらの研究は、2020年度から科研費基盤B「定在波型ハードX線レーザーの高精度制御とその応用」として行われている。

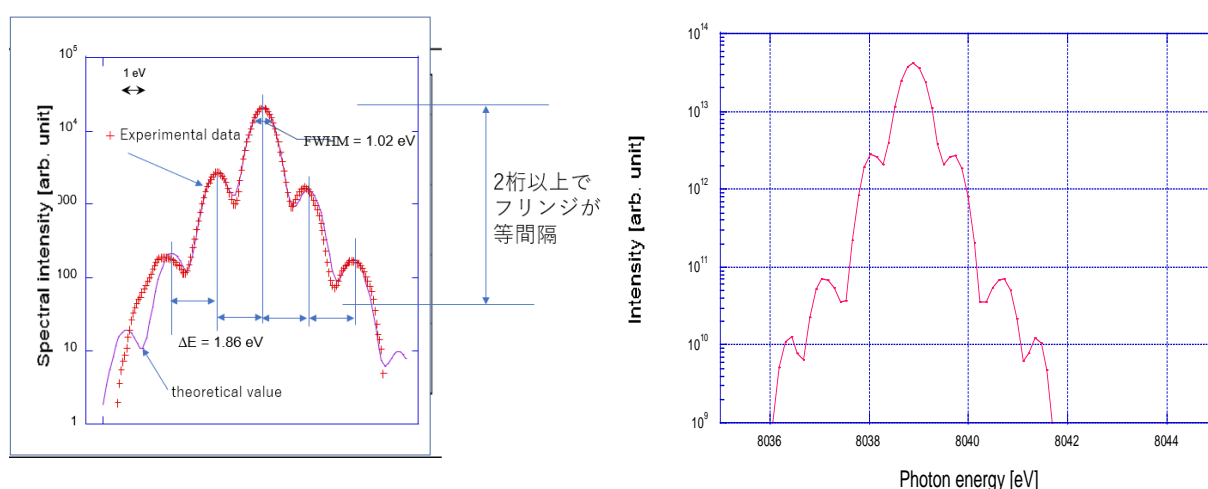


図 実験で得られたスペクトル（左図）と計算により再現されたスペクトル（右図）

2.2 超高耐力光学素子の開発

高出力レーザーを社会実装しようとした場合、あらゆる構成素子は、その信頼性を増加させる必要がある。特に、高強度パルスレーザーを集光して固体上に照射するレーザー加工や表面処理、プラズマ発生などでは、ターゲットから飛散するデブリ対策が重要になる。これを抜本的に解決するツールとして、オゾン混合ガスを利用した気体光学素子の開発を行っている。ここでは、紫外レーザーを用いてオゾンを含むガスに大振幅の密度波を励起し、その屈折率変調を使って回折光学素子を構成させているが、特に、その粗密波形状をフレネルゾーンプレートのような集光光学系にすることにより、ナノ秒で $1.6\text{kJ}/\text{cm}^2$ の高強度レーザーにも対応でき、回折限界まで集光可能な光学素子を作成した。

これらの研究は、JST 未来社会事業のレーザープラズマ加速プロジェクトの中で行われるとともに、科研費スタートアップ、科研費若手研究、科研費挑戦萌芽などでそれぞれの目的に応じた形で行われている。

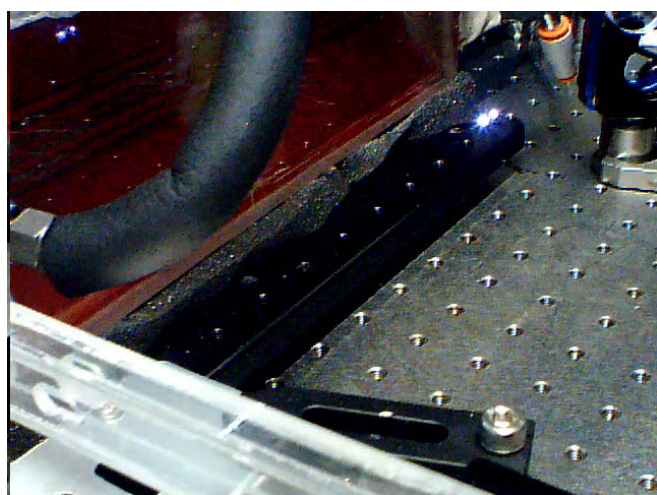
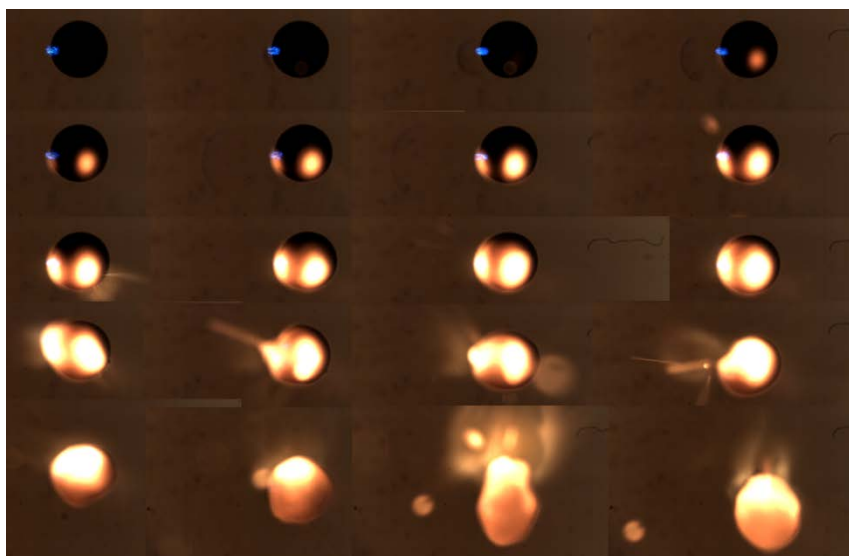


図2 オゾン混合ガスによる集光レンズ。左下にあるアクリルチューブの中をオゾン混合ガスが層流の様に流れ、窓なしの部分で、紫外レーザーにより書き込みを行っている。被回折レーザーは、左下から穴部を通して回折、集光され、右上の発光している点で集光されている。ここでは、およそナノ秒で 100mJ 程度の $1\mu\text{m}$ レーザーを集光し、空気の絶縁破壊を起こせるまで性能が上がっていることが実証されている。

2.3 レーザー加工部のその場計測システム

レーザー加工は、今後、付加価値の高い加工が必要になると言われている。特に、加工部の状態は、レーザー照射部では大きな密度温度勾配の中で行われることが多く、パラメータを計測する上で難点を生み出している。特に、加工部は融点を超え気化、プラズマ化しながら加工されているが、その流体力学的



な共同を調べるためには、一定密度・温度の状態を作り、その流体的な変化を観測する必要があるが、通常のレーザー加工部でこれを行うことはできない。そこで、ここでは、加工対象となる物質を電磁的なレビテーション技術で空中に浮遊し、そこにレーザー光を照射させることで、その物質の流体パラメータを観測できるプラットフォームを構築している。

图 3

空中に浮遊させた0.6mmの金属球に200W程度のレーザーを3方向から照射した状態。高温化され、球形から粘性を持って外側が崩れていっている様子が分かる。

この研究とともに、超短パルスレーザーを用いた非回折ビームによるナノメートル加工、超短パルスレーザー照射時の膨張時刻の検出と、新しい温度測定モデルの開発、なども行っている。これらの研究は、文科省QLEAPプロジェクトの一環として行われている。

2. 4 レーザー荷電変換の研究

我が国の特徴的な加速器として、茨城県の東海村にある大強度陽子ビーム加速器施設J-PARCがある。ここでは、400MeVまでの直線加速器部とその後にシンクロトロン加速器2台を用い、陽子を3GeVまで加速させ、ニュートリノ実験、ハドロン実験などの原子核物理研究や、ミューオン化学や中性子を用いた物質科学などの研究が行われている。この施設では、直線加速器部でH⁻負イオンを加速させ、それを最初のリング加速器に荷電変換させ陽子として入射・蓄積させ、高強度陽子ビームを生成させているが、この荷電変換部では、炭素膜が使われている。この炭素膜は、負イオンビームや周回している陽子ビームの衝突があるために、劣化し取り換えることになっているが、現在J-PARCは当初計画の高強度化MW運転を目指しており、そこでは数週間で加速器を止め、取り換えることになってしまい、改善が望まれている。そこで、我々は、レーザーによる荷電変換を考案し、その原理実証実験までを行っている。

このレーザーは、324MHzで加速される負イオン、陽子ビームのマイクロパルスに合わせる必要があるが、1荷電変換あたりに必要なレーザーエネルギーは、パルス幅100psで10mJ程度のものになる。このままでは、加速器サイトに3MWのパルスレーザーが必要になり、とても設置できる状態にないために、我々は折り返しミラーを使った多重折り返し光学系を導入し、その数10分の1のできるシステムを構築している。また、直線加速器は、シンクロトロンへのビームのローディングが終わると40ms程度入射を必要としなくなる。この間レーザーパルスを増幅しないシステムにすることで、kW程度の平均出力で荷電変換ができる設計を考えている。

これまでに、加速器のクロックに対応したシードレーザーをファイバーレーザー増幅器で200mWレベルまで増幅させ、それを5台のLD励起ロッド増幅器で増幅するシステムを構築した。

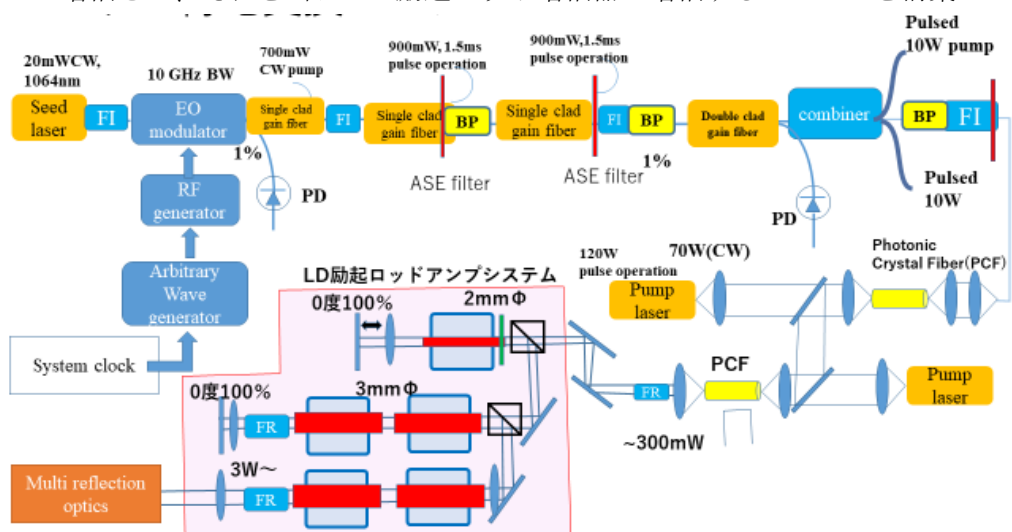


図 4
POP実験用ピコ秒パルス列レーザーシステム

このシステムを用い、J-PARC内にある3MeVテスト加速器において、原理実証実験を行った。そこでは、荷電変換をリアルタイムで評価できるように、324MHzの半分の繰り返し周波数でレーザーをビームに照射し、全体のビーム電流信号をFFTスペクトル化させ、そこで基本波324MHzの半分の162MHzの信号を得ることで変換効率を見積もれるようにした。その結果、現在のレーザーシステムでも最大16.8%の変換効率が達成でき、あとは、最終増幅段を数倍増強することで少なくとも第一段階の荷電変換は実機でも実証できることが分かった。これらの研究は、科研費基盤、日本原子力研究所萌芽研究、日米科学協力事業高エネルギー物理学分野研究の支援をもとに行われている。

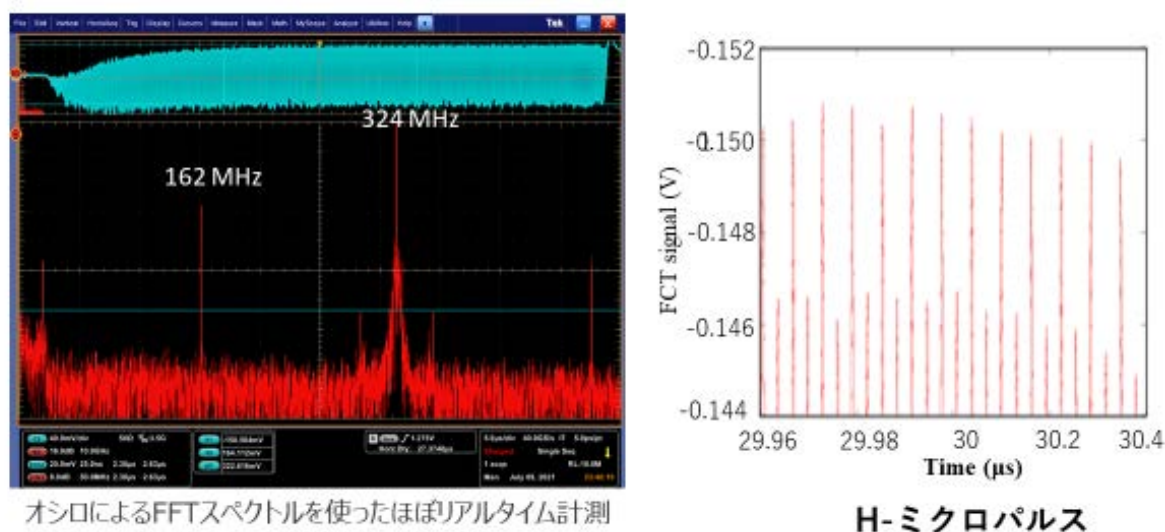


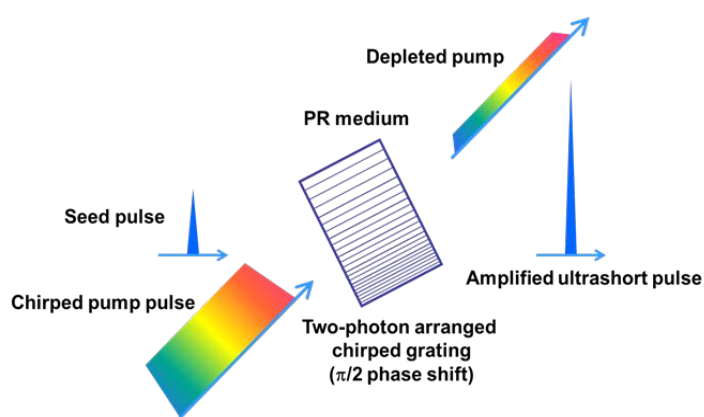
図5 J-PARC 3MeVテスト加速器におけるレーザー荷電変換の様子。レーザー照射によりH-ビームの電流が減少し変換されたことが計測されている。

2.2 西岡 一 研究室

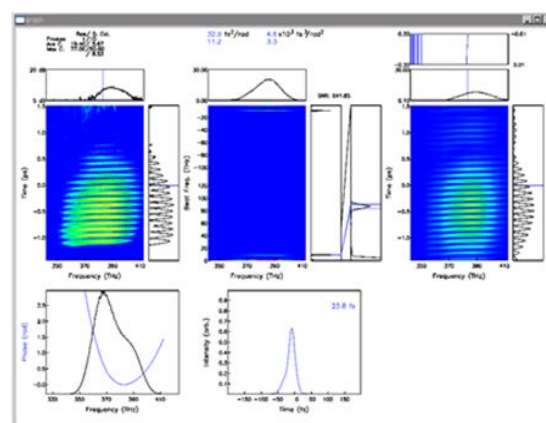
1. 研究・教育の概略

目に見える物質の色、反射の度合いは、その物質による光の吸収や物質中の光の速度を現している。日常見かけるこのような色や艶は、光の強度が弱く「そっと」観測している状態に相当する。光は電磁波であり、光の強度を上げていくと、光の電界によって物質中の電子やイオン等が揺さぶられ、光により物質の性質が変化する。超高強度のレーザーを用いると、原子核と電子が結びついている電場よりも高い光電場を印加でき、瞬時光電場により直接軌道電子を持ち去り、半サイクル後には、そのまま、原子に戻す事もできる。このような物質と光が混ざり合った状態では、物質の振る舞いは瞬時光電場に同期し、励起光に同期した他の波長の光を発生させたり、物質中を伝播する光そのものの速度を変化させたりする。フーリエ関係から、超高速現象は同時に超広帯域現象でもあり、光のキャリア周波数に匹敵する PHz (10^{15} Hz) 帯域幅を持つ光波およびその位相制御を行う技術領域でもある。

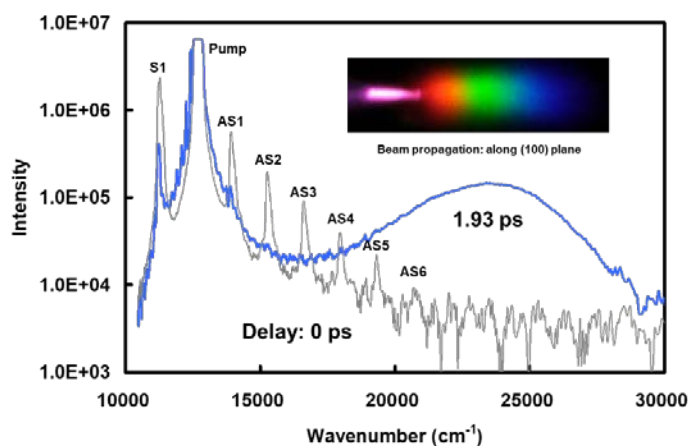
当研究室では、光周波数で数サイクルの電磁界扱っており、①超短パルス光・超高強度光・超広帯域光の発生技術、②光瞬時電場の波形成形・合波技術、③瞬時光電場計測技術、④高強度電場による分子やフォノンの位相同期技術の研究を推進している。



コヒーレントビーム結合によるサイクル光パルスの増幅
Few-cycle pulse amplification by coherent superposition



周波数シアリング干渉による瞬時電場の計測
Integrated spectrum shearing interferometer



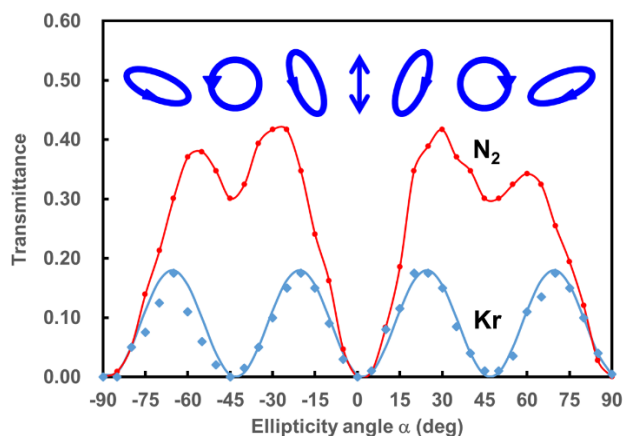
単結晶ダイヤモンド中のモード同期光学フォノンによる超広帯域光発生
Ultra-broadband light generation by the differential two-phonon excitation in a single crystal diamond.

2. 2020年度活動報告

2.1 回転誘導ラマン散乱を用いた単軸非線形偏光回転

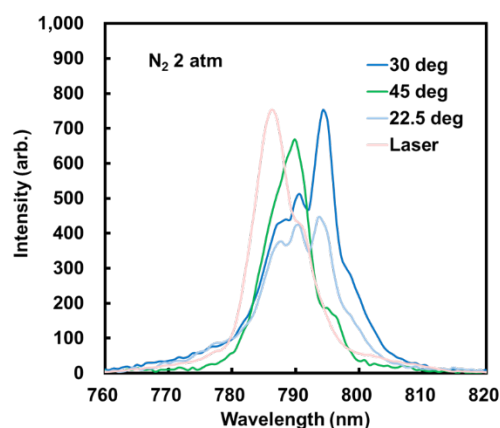
超短パルス・高強度レーザー光を媒質に印加すると、光電場の方向に非線形な分極を生じる。これを利用すると、光周波数に相当する超高速で非等方な位相変調が得られる。本研究では、気体のような完全等方媒質中を伝播する光自身の偏光を回転させることを目的に研究を行った。時間領域では、偏光スイッチにより、超高速パルス生成、高ダイナミックレンジ・高コントラスト化など、光波形成に利用できる。一方、空間領域では、強度依存の非線形空間フィルターを形成し、回折限界を超えた高強度レーザービームを生成できる。さらに、周波数空間では、超高速変調による広帯域化、波長変換等に応用できる。

単原子分子、2原子分子を中心に気体媒質による高強度ビームの自己偏光回転について励起光の偏光状態依存性について実験的に考察した。回転誘導ラマン散乱を応用して、完全等方媒質中における著しい偏向回転を実現した。数 100 GW レベルの超短パルス光を 40% 近い効率で直接スイッチングできる事を確認した。



単原子と2原子分子気体中における単軸非線形偏光回転の比較

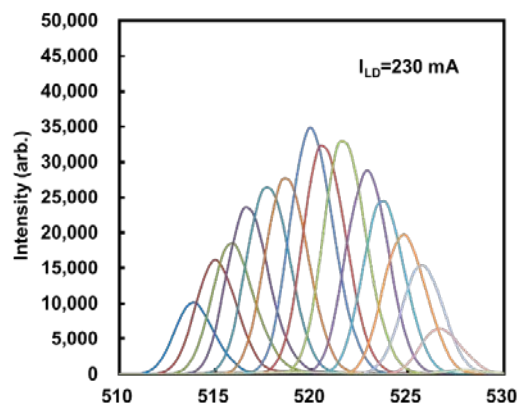
Comparison between the mono- and diatomic gas media in the nonlinear self-polarization rotation.



ストークス スペクトルの偏向状態依存性
Gated Stokes Spectra as a function of polarization state.

2.2 緑色半導体レーザーのコヒーレントビーム結合

GaN 系半導体レーザーの出現によって、青色光やこれを励起源とした白色光は広く実用化されている。一方、緑色領域では活性層の屈折率が下がるため、効率が低下し、発熱が多く高出力化し難い制限がある。本研究では、マルチモード半導体レーザーをコヒーレントに光結合し、縦・横シングルモードの緑色光の発生を行っている。波長選択共振器を介した相互注入同期により、波長可変コヒーレントビーム結合を実現した。



コヒーレント結合した緑色半導体レーザーの波長可変特性

Tuneable operation of coherently coupled green laser diodes.

2.3 白川 晃 研究室

1. 研究の概略

当研究室ではレーザーの特に高出力化を見据えた基礎研究開発を行っている。次世代高出力高強度レーザーを目指し、自由な発想で、新手法・高機能化・新材料に取り組んでいる。学生の自主性を重んじ、自由闊達に研究を行っている。

透明セラミック技術により物質場を高度に制御した、新しい広帯域利得・高熱伝導レーザー材料を探索し、それらを用いた半導体励起高効率フェムト秒発振器・増幅器の研究開発を行っている。利得媒質を100 μm 程度にまで薄くした thin-disk レーザー技術を自前で開拓し、高出力化・高エネルギー化に取り組んでいる。光ファイバーも高い排熱特性から高平均出力レーザーに適している。フォトニックバンドギャップやマルチコアなど、特異な導波路構造により電界を高度制御したファイバーを設計、開発し、新しい特性を発現するファイバーレーザーを研究している。

単体では限界のあるレーザーの高出力化のために、レーザーを並列化しそれらの位相を合わせてひとつのビームに結合し出力を加算する研究も重要である。別々のレーザーの複合共振器化や、ひとつのファイバーに複数のコアを設けたマルチコアファイバー(MCF)に取り組んでいる。輝度の加算だけでなく、各レーザーの位相制御により出力ビームの方向・パターンの制御が可能になり、革新的な応用展開が期待される。更にこのレーザー並列化による空間的ビーム結合に加え、超短パルスの高尖塔出力化、高エネルギー化のために、パルスをシリアルに加算する時間的ビーム結合への挑戦を始めている。

2. 2020年度の研究活動報告

2.1 モード同期Yb:CaF₂レーザーの開発

高い熱伝導率と広く滑らかな蛍光スペクトルを併せ持ち、高出力超短パルスレーザーに有望なYb:CaF₂単結晶およびYb:CaF₂系セラミックレーザーの研究を推進している。前年度CWの高出力thin-diskレーザー発振に成功した。今年度はバルクのYb:CaF₂単結晶でカーレンズモード同期(KLM)レーザー動作に成功した(図1(a)(b))。同材料のレーザーダイオード(LD)直接励起でのKLMは我々の知る限り世界で初めてである。最短85fsの変換限界パルスを得た。

またthin-diskレーザーでKLMを得るためにはdiskの励起耐力の向上が必要であり、接合条件を最適化し、熱解析モデルを提案し励起上限を決定した(図1(c))。接着材のガラス転移温度112度より励起強度10kW/cm²を超えて励起できると分かる。またKLM動作のための精密な共振器計算を行った。

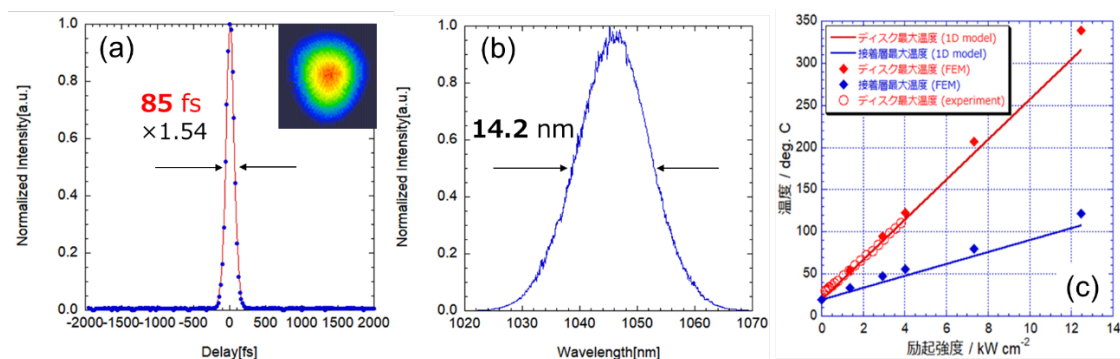


図 1. (a) サブ 100fs LD 直接励起 KLM Yb:CaF₂ レーザーの自己相関波形と(b)スペクトル。(c) Yb:CaF₂ thin-disk レーザーの温度上昇の様子。直線は提唱した熱モデル。白丸が実験下でのディスク表面の測定温度。

2.2 位相同期マルチコアファイバーレーザーの研究

可飽和吸収体(SA)を用いてin-phaseモードの選択とパルス発振を同時に実現する方法を考案，研究している。SAは，強度が低い光には吸収体として損失を与え，強度が高い光には吸収が飽和し損失が低くなる。従ってMCFの遠視野にSAを置くことにより，他のスーパーモードより高い強度を持つin-phaseモードを選択励振でき，同時にQ値変調器として作用するので，Qスイッチによる高エネルギーパルスを得ることに成功していた。そして本年度、高速応答の半導体可飽和吸収体鏡(SESAM)を用いて、位相同期とモード同期の同時実現に世界で初めて成功した（図2）。Yb添7コアマルチコアフォトニック結晶ファイバーを用いた全正常分散ファブリ・ペロー共振器で、ノイズライクで333nJ，平均出力14.1W，シングルパルスで平均出力5.8W，137nJの高平均出力高エネルギーピコ秒パルスを直接発生し，MCFレーザーによりパルスファイバーレーザーのエネルギースケールアップが可能であることを実証した。遠視野ではなく近視野にSAを置いており，そのモード選択機構の解明を進める必要がある。

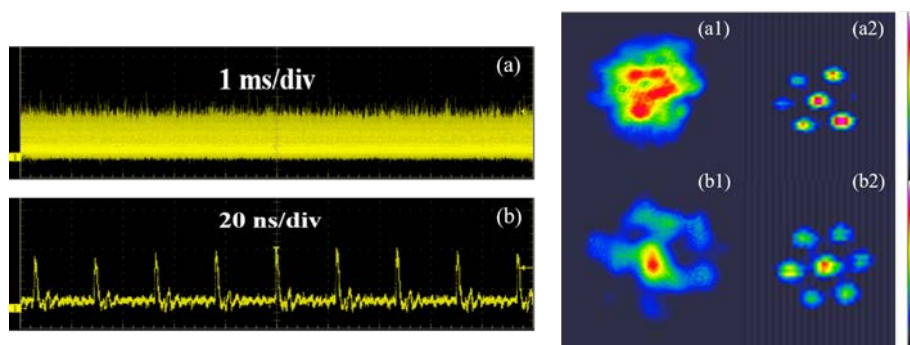


図2. 位相同期モード同期7コアYb添加MCPCFレーザーの(a)(b)パルス列。CW時の(a1)遠視野像と(a2)近視野像。SESAMによる位相同期モード同期時の(b1)遠視野像と(b2)近視野像。

パワー・エネルギーのスケールアップには増幅器が不可欠である。AIの一手法である深層強化学習を用いた複数ファイバー増幅器のコヒーレントビーム結合を提案、研究している。MCFのようなtiled aperture配置の遠視野像を取得しその画像解析からリワード関数を得ることにより，最大19コアで同手法の適用性をシミュレーションで確認した（図3）。系の複雑化なしにコヒーレントビーム結合が可能であり，コア数の増加に対し優れた拡張性を持つ。パルスエネルギーの向上の最も有用な手法のひとつと確信する。

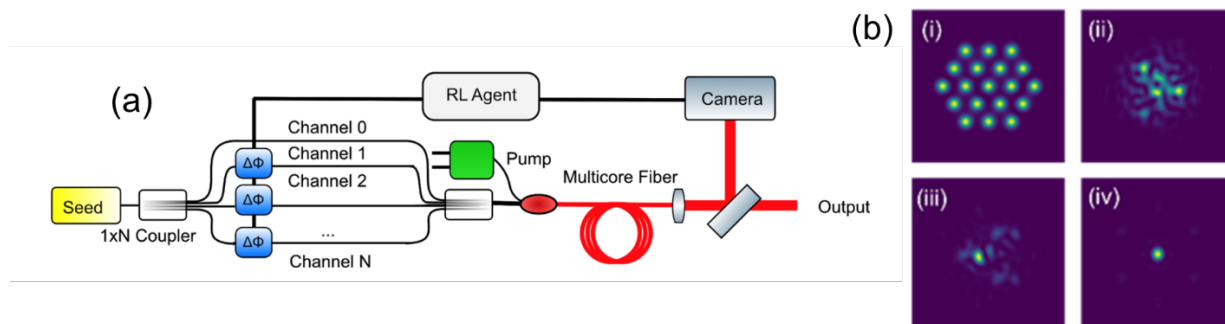


図3. (a) 深層強化学習によるMCF増幅器のコヒーレントビーム結合の概念図。(b) 19コアファイバのシミュレーション。(i)コア配置(近視野像)，(ii)(iii)学習中の遠視野像，(iv)学習後の遠視野像。

2.4 武者 満 研究室

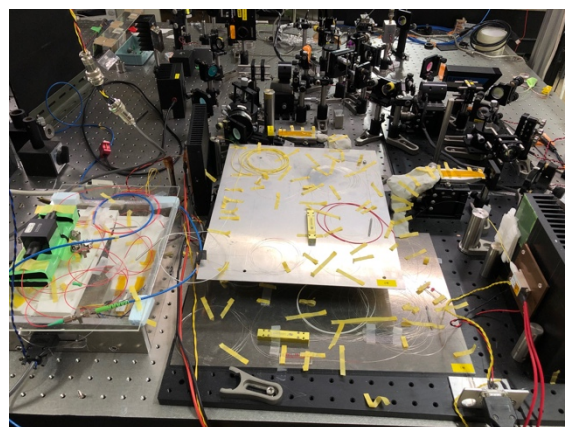
1. 研究の概略

当研究室では、周波数・強度安定化レーザーの開発とその応用に関する研究を行っており、特にレーザーの高い周波数安定度を利用した精密計測用の光源や計測手法の開発などにより物理学の進展を目指しています。現在は宇宙重力波検出器 DECIGO 計画のための超高安定化光源と検出に使う人工衛星の精密位置計測の手法についての開発と、次世代準天頂衛星用の精密マイクロ波基準信号の開発の 2 本の柱を中心に研究を進めています。両方とも JAXA を中心とした共同研究体制で行っており、次世代の宇宙開発にレーザーを中心とした光学技術を広く使うべく進めています。

2. 2021年度の研究活動報告 (2020年4月～2021年3月)

2.1 宇宙重力波検出器DECIGO用光源

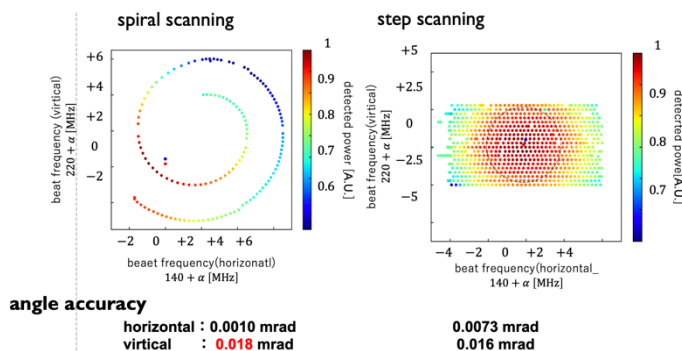
地上のレーザー干渉計型重力波検出器では計測できない低周波重力波を検出するため、宇宙重力波検出器 DECIGO が計画され 2030 年代の打上げを目標に計画が進められており、この DECIGO 実現のためのキーデバイスである高出力・超高安定光源の開発を行っている。これまで波長 1030nm の Yb 添加 fiber DFB レーザーを光源として、ヨウ素の飽和吸収とした周波数安定化と fiber MOPA を用いた高出力化を進めてきた。今年度は周波数安定化に関しては中・長期の周波数安定度を制限



している残留強度変調(RAM)の抑圧を行った。位相変調時に発生する RAM を検出して位相変調用結晶(EOM)の温度と変調信号の DC 電圧を共に制御することにより RAM による周波数雑音制限を 10^{-15} 以下に低減させた。高出力化については、1 台の主レーザーから分岐させ増幅した光を基に発生させた第 2 高調波光を干渉結合させた SHG コヒーレント加算を実現させ、結合効率 85% 以上と強度安定化に成功し将来の高出力化に向けた筋道をつけた。

2.2 精密衛星捕捉システム

DECIGO は一辺 1000km の正三角形型の Fabry-Perot Michelson 干渉計で重力波検出を行うが、これには従来行われていない 3 台の人工衛星による精密編隊飛行が必要である。このためにレーザーを用いた衛星の遠距離位置決定システムを提案して実証を進めている。音響光学偏光器を利用した本システムは遠望で受けた信号から得られる周波数情報から人工衛星間の相対角度・距離を算出することで、本年度は 2 次元測角システムの開発と光ファイバを用いた長距離測距の原理実証について行い、0.08mrad の測角精度と 6m の測距分解能が得られた。また装置の小型化を進めて今後は長距離真空パイプを用いた実証実験を行う予定である



2.3 光を用いた精密マイクロ波発生装置

現在日本で推進している次世代測位システム(GNSS)計画では、使用する準天頂衛星衛星に搭載するマイクロ波基準の安定度を高めることにより測距精度を向上させる事を予定している。この高安定マイクロ波を光を用いて発生させる方法を提案し開発を行っている。DECIGO用に開発しているヨウ素安定化レーザーを光周波数基準として用いて、この光周波数を光コムを用いて下方周波数変換させることにより 10^{-15} 台の超高安定マイクロ波の発生を行う。このため衛星での運用が可能な堅牢性を持つ光コムとしてfiber Mode-lock laserを開発している。特に堅牢性を考慮して、光コムとしてはあまり用いられていないEr添加figure-8 NALM fiber mode-lock laserを作り光コム化を進めている。本年度は設計を最適化することにより困難とされてきたself-startを実現し、狭線幅のfceo信号を取得することによりコム化へ大きく前進した。また衛星搭載用には様々な環境試験が必要であり、その1つである熱試験を実施して厳しい熱環境下での連続動作の確認と熱解析を行った。

2.5 戸倉川 正樹 研究室

1. 研究・教育の概略

戸倉川 研究室は次世代の固体レーザー、ファイバーレーザーの開発とその応用を目指している。現在は特に Tm 添加媒質及び Cr 添加媒質を用いた波長 2~2.5 μm 帯短パルスレーザーの開発、それを応用した 2.5~20 μm 帯中赤外光発生を行い、従来の近赤外波長 0.8~1.5 μm レーザーにはない特徴を利用したレーザー加工やバイオイメージングへの応用研究を目指している。

教育方針としては学生の自主性を尊重しつつしっかりと研究を進めて、難しいことも楽しみながら進めていける人材の育成を目指している。

2. 中赤外レーザーの応用

中赤外領域 (波長2-20 μm 帯)は分子の指紋領域とも呼ばれ、各種分子の振動スペクトルの宝庫であり(図1)これを利用した下記のような応用が存在しています。

- ・レーザーメス、疾患選択的光線治療、呼気分析などの医療応用
- ・ポリマー材料の切断・溶接加工、シリコン材料のステルス加工
- ・分子振動イメージング

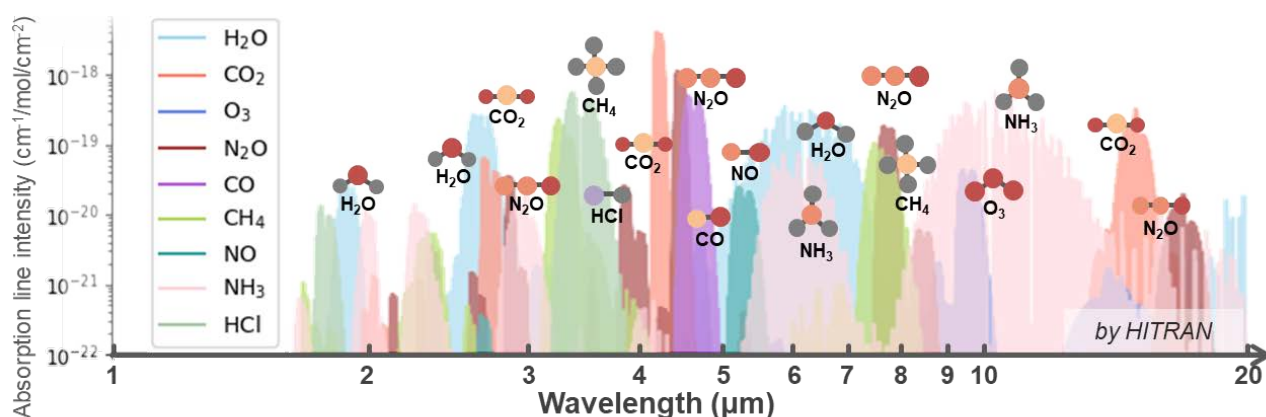


図1. 分子の指紋領域中の気体分子の吸収線 (<https://hitran.org/>)

3. 中赤外レーザー光の発生方法と課題

中赤外領域光は古くから熱光源やシンクロトロン放射光を光源とした応用が進められてきた。しかしこれら光源は輝度、コヒーレンス、アクセシビリティなどの制限が存在する。このため近年では近赤外超短パルスレーザーを利用した非線形波長変換による中赤外光発生によって上記制限の緩和が進められてきたが、波長4.5 μm 以上では依然として得られる輝度の制限が強い。我々の研究室では高出力・高効率な、超短パルスTm、Crレーザーを開発し、これを用いて上記問題の解決を目指しています。

波長2 μm 帯Tmレーザーは高出力・高効率性に優れており、波長~2.4 μm 帯Crレーザーは超短パルスレーザー動作に優れており中赤外のTi:Al₂O₃レーザーとも呼ばれている。これらレーザーは中赤外光を利用した光科学応用において非常に重要であるが、日本国内での研究は海外と比べて遅れている。我々はこれらレーザーの基盤技術から超短パルスレーザー、非線形波長変換、及び応用に取り組んでいる。

4. 2020年4月～2021年3月の研究活動報告

4.1 波長2 μm 帯Tm:Re₂O₃複合利得媒質を用いた超短パルス固体レーザーの開発

新規レーザー利得媒質であるTm添加三二酸化物(Tm:RE₂O₃、RE=Y, Lu, or Sc)を用いた、波長2 μm 帯超短パルスレーザーの開発を行った。このとき発振器ないで異なるホスト材料のTm利得媒質を同時に使用する複合利得媒質という手法を用いてTm添加固体レーザーで最短となる41 fsの超短パルス発振に成功した。また共振器内での非線形光学効果の利用による更なる短パルス化の可能性を示すことに成功した。

4.2 Cr:ZnSレーザーの開発

遷移金属利得媒質Cr:ZnSを用いて、半導体可飽和吸収体によるモード同期発振に成功した。現在スペクトル幅1 nm以下であり、10ps程度のパルス幅で動作していると考えられる。半導体可飽和吸収体に加えてカーレンズ効果を用いることにより40 fs以下の超短パルスレーザー動作が期待でき、今後これを利用した2.5-20 μm 帯中赤外光発生を予定している。

4.3 バイオイメージング応用研究の立ち上げ

主要な生体組織(DNA/RNA、タンパク質、脂質、糖質)は分子の指紋領域に特異的な吸収線を有している(図2)。この吸収線を利用した中赤外フォトサーマル顕微鏡の開発を進めるべく、脳・医工学研究センターとの連携研究を開始した。フォトサーマルイメージングでは中赤外の励起光吸収によって選択的に対象分子を加熱し、温度変化による屈折率変化を高空間分解能な可視光プローブで検出することによって、非標識な分子振動イメージングを可視光の空間分解能で実現する(図3)。吸収の反応断面積はラマン散乱などと比べて数桁以上高く、ロックイン検出を用いると、1 pJ/ μm^2 以下の励起光密度で発生する10-1度以下の温度変化を測定可能であり、光毒性による生細胞の劣化を防ぐことが可能である。その中で可視光を用いたフォトサーマル顕微鏡の復旧作業を行いミトコンドリアの観察を行った。

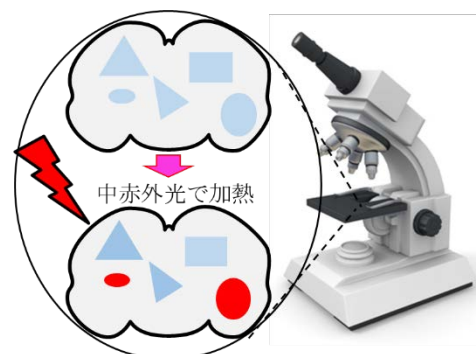


図3. 中赤外光を照射すると吸収が存在する組織のみが加熱され屈折率が変化する。この屈折率変化を可視光プローブで検出。

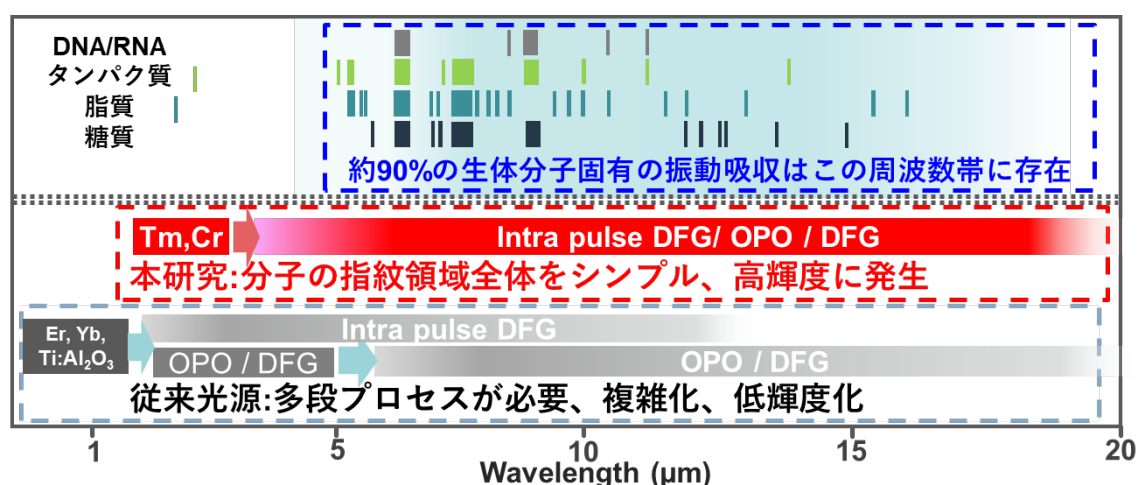


図2. (上) 主要な生体組織の中赤外吸収スペクトル、
(下) 中赤外光源、近赤外光源を利用した非線形波長変換システムの特徴

2.6 中川 賢一 研究室

1. 研究目標

当研究室では、レーザー光で原子の運動を制御するレーザー冷却・捕捉技術の研究と、この技術を用いて得られるレーザー冷却原子を量子技術に応用する研究を行っています。量子技術とは、量子力学の特異な性質を利用して従来技術の限界を超える新しい技術を実現しようというもので、これには量子暗号、量子計算、量子センサーなどがあります。温度が $100\mu\text{K}$ 以下のレーザー冷却原子は、量子力学的な性質が顕著に現れるため、これを利用した量子シミュレーターおよび量子慣性センサーと呼ばれる量子技術の研究を行っています。

2. 2020年度の研究の概要

2.1 Rydberg原子を用いた量子シミュレーターの開発

量子シミュレーターとは、人工的に実現した量子多体系を用いて計算機シミュレーションでは難しい量子多体系の振る舞いを模倣して、その特異な物理的な性質を調べようというもので、量子計算機の一つです。当研究室では、レーザー光を用いて複数の冷却 Rb 原子を真空中に 1 個ずつ並べて相互作用するスピン系の振る舞いを模倣する量子シミュレーターを実現しています(図 1)。原子にレーザー光を照射して、主量子数が 50 以上のリュードベリ (Rydberg) 状態に励起することにより、離れた原子間に大きな相互作用を作り出すことができ、隣り合うスピン間に相互作用があるイジング型スピン系の量子シミュレーションが可能になります。現在までのところ、10 個以下の原子を用いて量子シミュレーションを行い、量子力学的な相関がある量子多体系の振る舞いを再現しています。さらに原子の数を増やしてより複雑な量子スピン系のシミュレーションを実現可能にするため、実験装置の改良を行っています。その一つは、原子をリュードベリ状態に励起するための周波数安定化レーザー光源の開発で、これによって量子多体系の長いコヒーレンス時間が得られ、10 個以上の多くの原子からなる複雑な量子多体系の振る舞いを精密に調べることが可能になることが期待されます。

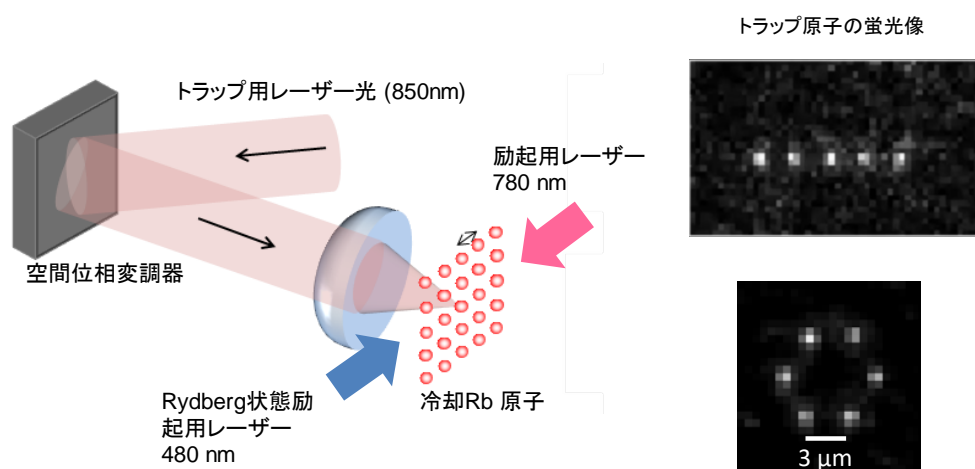


図1 Rydberg状態の冷却Rb原子を用いた量子シミュレーター

2.2 レーザー冷却原子を用いた量子慣性センサーの開発

物質波の干渉を用いる原子干渉計は様々な物理量の高精度な測定に利用できます。その中でも原子に働く力を原子干渉計によって高精度に測定する量子慣性センサーは、精密な重力加速度の測定や慣性航法などの高精度なナビゲーションなどに応用することができます。現在、文科省の光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)において、この量子慣性センサーの研究開発を行っており、地球物理や資源探査などの分野で利用可能な小型で高性能な重力加速度計の実現を目指しています。2020年度は、開発した原子干渉計の基本動作の確認を行い、干渉信号より重力加速度の測定を行っています(図2)。また小型の可搬型重力加速度計の開発に取り組み、小型のガラスセルを用いた超高真空装置からなる原子干渉計のセンサーヘッド部の開発を行いました(図3)。既に開発した可搬型のレーザー光源と組み合わせることにより、実験室外のフィールドに移動可能な可搬型の重力加速度計が実現可能となります。このため、この開発した装置の動作確認および、性能評価を行って、実用化を行っていく予定です。

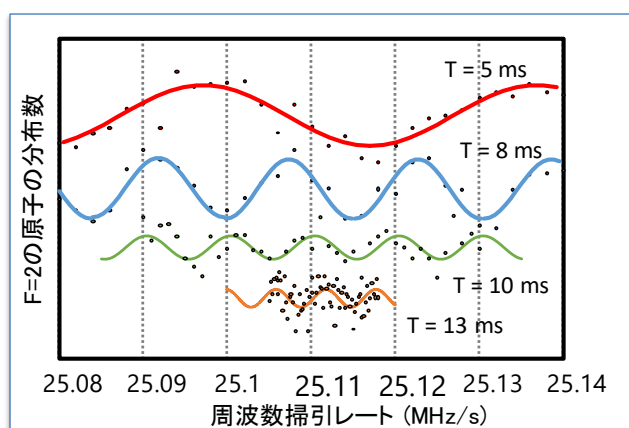


図2 原子干渉計による重力加速度測定

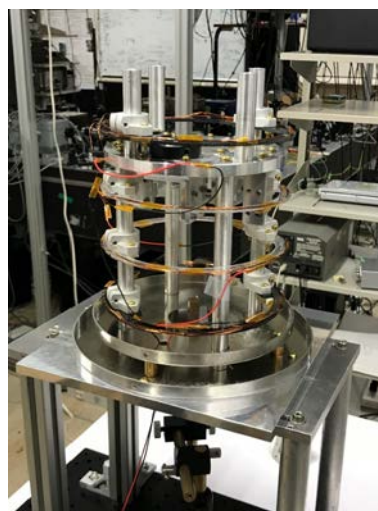


図3 冷却原子生成用の小型超高真空装置

2.7 丹治はるか 研究室

1. 研究の概要

本研究室では、

- 微弱光（数光子）による非線形光学効果の観測
- 光共振器中の低温原子を用いた「量子光源」開発

という二つのアプローチで、光と原子の量子状態制御を基盤とした新たな量子技術の創出を目指した研究に取り組んでいる。

1.1 微弱光による非線形光学効果の観測

次世代の通信技術として期待される量子情報通信においては光子が唯一の実用的な通信媒体であると考えられている。光子により伝達された量子情報を効率的に処理するためには光子同士を直接相互作用させることが望ましいが、このような相互作用は原理的に起こすことができない。一方、物質を介した光子同士の実効的な相互作用を起こすためには非線形光学効果を利用する必要があるが、通常このような効果の観測には高強度の光が必要であり、数個程度の光子しか含まないような微弱光での観測はほぼ不可能である。当研究室では、高フィネス光共振器中における物質と光子との強い相互作用を利用して、数光子程度の微弱光による非線形光学効果の観測を目指している。

1.2 光共振器中の低温原子を用いた「量子光源」開発

量子力学の性質を利用した従来技術の限界打破への期待が高まる量子情報処理や量子計測においては、光の量子状態を自在に生成できることが重要である。当研究室では、光共振器を用いて単一原子の励起状態を単一光子に高効率に変換するという手法により、光の任意の量子状態の生成を目指している。気体原子をレーザー光により数十 μK 程度まで冷却し、これを光共振器中に捕捉した上で一部を励起すると、これらの原子が脱励起する際に原子の励起状態に対応した光の量子状態が共振器中に生成される。原子の励起状態の生成方法を工夫することにより、光子数状態や量子もつれ状態を含む様々な光の量子状態を単一の実験系において生成することのできる「量子光源」が実現すると期待される。

2. 2020 年度における進捗状況

2.1 微弱光による非線形光学効果の観測

微弱光による非線形光学効果の観測を実現するためには、超高真空中の高フィネス光共振器（実験共振器）中の光子と ^{87}Rb 原子との強い相互作用を利用する。

まず、高フィネス光共振器に用いる高反射ミラーの特性評価を行った。当該ミラー2枚を用いた共振器について、cavity ring-down法を用いてフィネス \mathcal{F} を測定した。その結果、 $\mathcal{F} = (6.6 \pm 0.1) \times 10^4$ となり、反射率が $(99.99524 \pm 0.00007)\%$ であることが分かった。これは、ミラーの仕様から想定される反射率より低く、ミラーの取り扱いの際に汚れが付着した可能性があり、クリーニングの必要があることが判明したため、クリーニングの後に再評価を行うこととした。

光共振器モード中の光子と原子の強い相互作用を実現するためには、高フィネス光共振器の共振周波数を原子 (^{87}Rb) の共鳴線に対して安定化させる必要がある。その際、実験共振器中に捕捉する ^{87}Rb 原子の内部状態の変化を回避するために、 ^{87}Rb 原子の共鳴線 (波長 780 nm) から大きく離調した非共鳴光を使用する必要がある。従来は非共鳴光として波長 760 nm の光を、大気中の参照共振器を利用して原子の共鳴周波数に対して安定化させ、さらにその光を用いて実験共振器を安定化させる方法を採用していた。この方法では、実験共振器の安定化には、原子の共鳴光に対する参照共振器の安定化、参照共振器に対する原子の非共鳴光の安定化、非共鳴光に対する実験共振器の安定化、の三段階の過程を経る必要があり、安定化に必要な過程が複雑であることにより、実験系全体を安定的に動作させることが困難であった。そこで、参照共振器を用いる代わりに、周波数基準としてカリウム原子を利用し安定化させたレーザーを実験共振器の安定化に用いる、という新たに考案した方法の実装を開始した。まず、波長 767 nm の外部共振器型ダイオードレーザーの構築を行い、シングルモード発振を確認した。さらに、実験共振器が十分な周波数安定度を持つように安定化させるにあたり、Doppler-free DAVLL法を用いてレーザーをカリウム原子の吸収線に安定化する際に必要な安定度を見積もった。さらに、その安定度を得るための Doppler-free DAVLL法の光学系に対する要求仕様を明らかにした。

また、光共振器中に捕捉する予定の冷却原子の準備を行い、 ^{87}Rb 原子の磁気光学トラップを実現した (図1)。

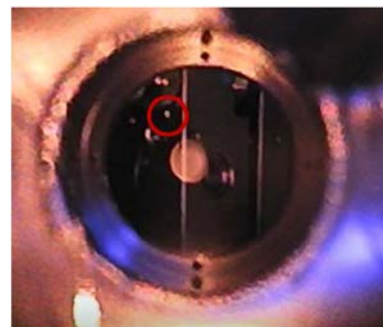


図 1 : 観測された ^{87}Rb 原子の磁気光学トラップ

2.2 光共振器中の低温原子を用いた「量子光源」開発

「量子光源」を構築する上では、生成した光の量子状態を高効率で自由空間モードに取り出すことが極めて重要であるため、本研究では、反射率が非対称なミラーを用いたファブリペロー型光共振器を用いる。この光共振器中に原子を冷却・捕捉し、それらの原子のうちの一部が Rydberg 状態に励起された集団励起状態を生成することにより、様々な光の量子状態の発生を目指す。Rydberg 状態への励起には、波長 780 nm および 480 nm による二光子遷移を用いる。

2020 年度には、Rydberg 状態への波長 780 nm と 480 nm による二光子励起に向けた光源を整備し、安定化を行うための誤差信号を得た。

波長 780 nm と 480 nm の二光子遷移による ^{87}Rb 原子の Rydberg 励起を行うためには、これら二つの光源を ^{87}Rb 原子の Rydberg 遷移に対して安定化させる必要がある。そこでまずは ^{87}Rb 原子の D2 遷移に対して安定化させた 780 nm の光源を準備した。さらに、Ti:sapphire レーザーの 960 nm の光を基本波とし、bow-tie 型共振器中の PPKTP 結晶を用いて 480 nm の倍波を発生させた。Bow-tie 型共振器のアラインメントと温度位相整合の最適化を行うことでパワーの最大化を図った結果、

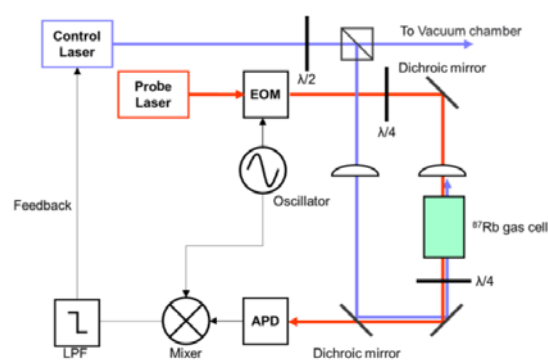


図 2 : EIT を用いた誤差信号生成のための光学系

基本波パワー 710 mW において 190 mW の倍波パワーを得た。

さらに、図 2 に示すような系を用いて、780 nm と 480 nm の二波長における電磁場誘起透明化 (EIT) のスペクトルを利用した FM 分光法による誤差信号の生成を行った。 ^{87}Rb 原子の飽和ガスセル中での二波長の光の重なりを最適化した結果、主量子数 $n = 70$ において、図 3 に示すような誤差信号を得た。

さらに、単一光子源の特性評価を行うための、光子統計評価システムの開発を行った。具体的には、Hanbury Brown-Twiss 型の光学系を用いて二つの検出器における光子の到達時刻を検出し、それらを用いて二次の自己相関関数を計算するプログラムを開発し、微弱なコヒーレント光を用いてその動作確認を行った。

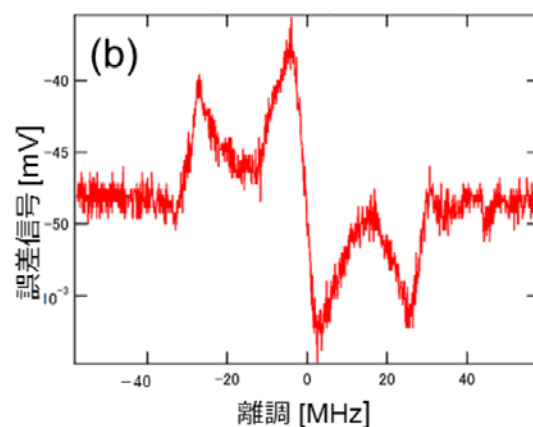


図 3 : 主量子数 $n = 70$ における誤差信号

2.8 森永 実 研究室

1 研究・教育の概要

本研究室ではレーザー冷却された原子を用いた原子光学系、原子線ホログラフィー、量子反射といった原子光学をバックグラウンドにした量子光学の実験的研究を行っており、特に新たな実験手法の開発に力を入れている。一方、最近では研究分野を広げるべく不透明マスク列による導波路の開発や、非対称振動を用いた表面付着粒子の輸送の実現やアクチュエータの開発など新しい取り組みも行なっている。後者については固体の構造を設計することにより Casimir-Polder 力の制御を行ない（「設計された真空場」）それを冷却・トラップされた原子を用いて実験的にプローブし構造設計にフィードバックすることになげたいと考えている。他に個人的な興味として加速座標系や重い回転物体近傍での引摺り効果による座標系の非自明な回転（Thomas 歳差運動や Lense-Thirring 歳差運動）、電磁場-電子系の量子論（量子電磁気学）に存在すると感じる若干の冗長性の解消なども探求対象としている。また今年度より量子科学センターと連携して水素原子の高分解能分光・レーザー冷却に向けた勉強会を発足させた。

教育面では学生には既存の装置を使うだけでなく新しい装置を考案・開発する能力、大学・大学院ならではの研究を掘り下げる能力などを身につけて社会に出て行って欲しいとは考えているが、学生個人個人に応じて興味を持てること、向いていることを見きわめながら取り組むテーマを考えるよう心がけている。ただし今年度はコロナ禍の影響で実際に手を動かして作業をする時間が不足しがちであった。

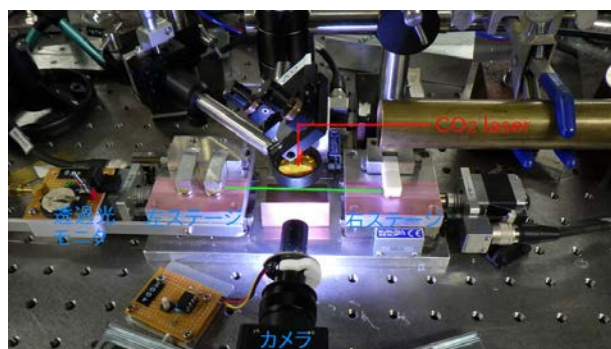
2. 2020 年度の研究活動

主要な取り組みおよび最近進展のあった研究活動の 2 つについて紹介する。

2.1 単一光子源のためのテーパー状光ファイバーチップの製作

テーパー状に尖らせた単一モード光ファイバーの先端に量子ドット等の単一発光体を取り付け、発生した単一光子を高効率よく伝送路である単一モード光ファイバーの伝搬モードに結合させたものを単一光子源として用いて、単一光子による量子通信の実現を目指している。

単一モード光ファイバーを伝搬する光はテーパー領域に差し掛かると伝搬モードである最低次モードはファイバー径が細くなるにつれコアが消失する付近でクラッドも含めた多モードにさらされるため一般には最低次モードから高次モードへの遷移が起きる。この遷移を防ぐためにはテーパー角はこの付近で最も小さく抑える必要がある（断熱条件）。光ファイバーを加熱・延伸してテーパー状にする際に一様な温度分布で引き延ばすとより細い部分で伸び率がより高くなる。このため前述の断熱条件が厳しくなる領域で条件を満たそうとすると先端側のより細い部分が「無駄に」長くなり機械的強度を低下させることになる。中間部分が細くなっている通常のテーパー状ナノ光ファイバーでは両端で支えることができるためそれほど大きな問題とならないが、片持ちする必要があるファイバーチップでは回避する必要がある。

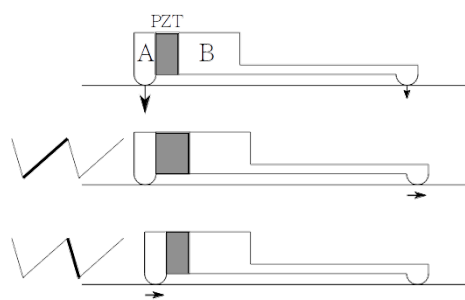


加熱される区間の長さを L とすると加工されたファイバー径は概ね $e^{-z/L}$ のように変化するため、前述の機械的強度確保のために加熱幅の狭い CO_2 レーザーを加工に用いている（前頁の写真は現在の自作加工機）。以前はレーザーの出力制御にレーザー付属のコントローラを用いていたがより細かい制御およびファイバーを引くステージの制御と連携を取るためマイコン（M5Stack）によるコントローラを開発した。このことにより全体としては概ね希望する形状に加工することが可能となってきた。ただし先端直径が必要とされる $1\mu\text{m}$ 程度に対してまだ2倍程度あるという問題を解決する必要がある。

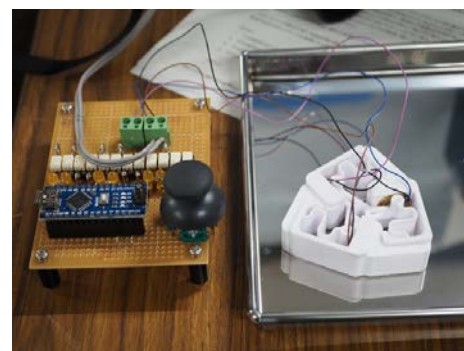


2.2 非対称振動による表面付着粒子の輸送とアクチュエータの開発

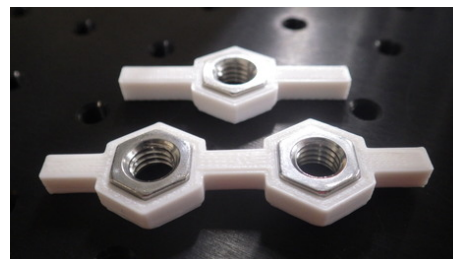
表面に粒子が付着している固体基板に面内方向の振動を加えると振動による加速度がある一定値を超えたときに粒子の表面からの剥離が起きる。通常の振動ではこの一定値を超える加速度はある向きで起きればその反対の向きでも起きるので粒子の固体表面内での運動は拡散的である。一方ノコギリ波のような波形の振動においては剥離は一方向のみでおき、粒子の面内での特定方向の輸送が可能となる。



これまでにこの現象の応用としてアクチュエータの製作を行ってきた（slip-stick アクチュエータ）。一番簡単な1次元の並進運動をするもの（原理図・右上）と2次元（並進×2+回転）に拡張したアクチュエータがあり、後者は幾何学的な配置を改良しより良好な動作が得られるようになった（右中の写真）。



表面に吸着している粒子の移送に適用する場合、対象となる粒子のサイズが小さくなるほど大きな加速度を加える必要があり、実用上何らかの共鳴機構が必須となる。「非対称振動」を実現するためには振動周波数が整数比となる少なくとも二つの共鳴を持つ必要がある。そこで ω と 2ω で共鳴する振動子、および $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$ で共鳴する振動子の設計・試作を現在行なっている（写真は単一の共鳴を持つ振動子（上）と二つの共鳴をもつ振動子（下））。



2.9 岩國 加奈 研究室

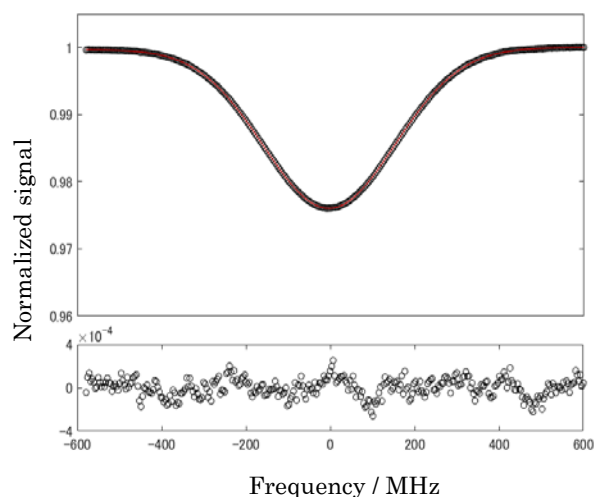
1. 研究の概略

当研究室は2019年1月に発足した研究室である。周波数が精密に制御されたレーザーの開発とそれを用いた種々の分光計を開発し、精密分子分光に応用している。主に大気中に存在する分子を対象とし、大気中で起こる化学反応のメカニズム解明やその制御を目指している。精密さの向上には分子の冷却技術が必須であり、そのため岡山大学、理研、富山大学と冷却分子源生成の共同研究を行っている。また、開発したレーザーや分光手法を、分子分光にとどまらない様々な物理量の計測手法に展開していくため、産総研や本学医工センターなど学内外との共同研究を進めている。

2. 2019年度の研究活動報告

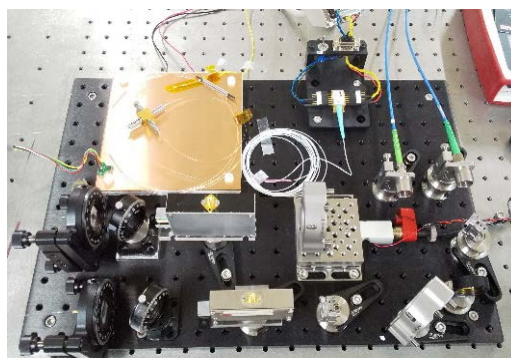
2.1 光コムを用いた高感度分光計による N_2O 分子の遷移周波数測定

光コムに安定化することで精密に周波数が安定化された波長 $1.52\ \mu\text{m}$ の外部共振器型半導体レーザーを開発した。これを分光光源として用い、マルチパスセルの中に封入した N_2O 分子の吸収スペクトルを観察した。 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯に存在する N_2O の吸収は3倍音であり、遷移強度が非常に弱い、ルビジウム原子時計に安定化された光コムで制御しながらレーザー周波数を往復掃引することで、高い信号ノイズ比でスペクトルを観察することができた。 P ブランチと R ブランチの合計40本以上の吸収線を測定し、それらを解析して、遷移周波数を相対不確かさ 10^{-9} で決定した。右図は観察した 3ν 振動バンドの $P(14)$ 遷移の吸収スペクトルを示す。



2.2 デュアルコム分光計開発に向けた光コム光源の開発

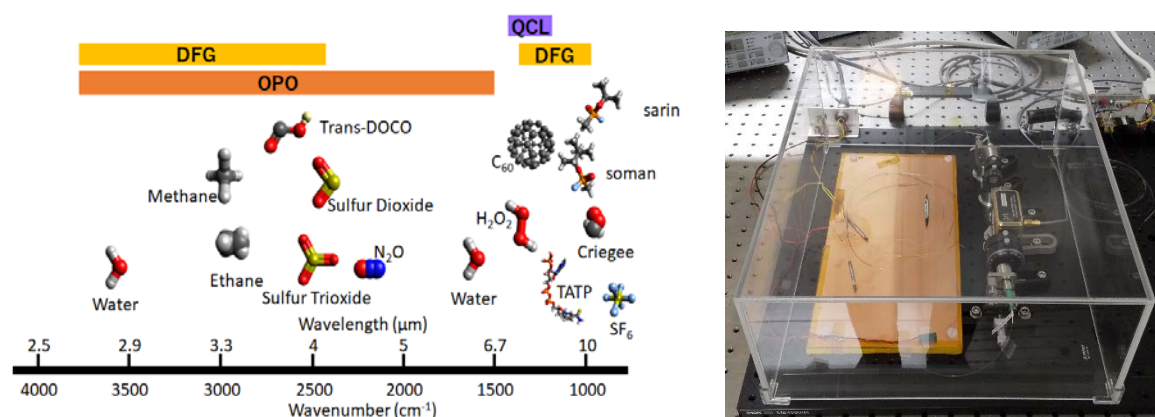
デュアルコム分光計は従来のフーリエ分光法に比べ、広帯域かつ高分解能なスペクトルを短時間に取得できる分光計として、近年盛んに研究されている。これらの性質に加え、新たな物理計測への応用を見据えて、本研究室では1台のレーザー共振器で行うデュアルコム分光計を開発している。右の写真は開発した分光計の光コム光源を示す。このレーザー共振器は偏波保持ファイバーと空間部で構成される9の字型をした共振器で、非線形増幅ループミラーでモード同期を実現する。



レーザー共振器中を伝搬する直交する偏向成分それぞれでモード同期を実現するが、この際、共振器長に僅かな差を設けているため、繰り返し周波数 f_{rep} が異なる2つの光コムが出力される。現在、片方の偏向成分でモード同期が実現し、繰り返し周波数は71 MHzであった。

2.3 中赤外発生用光コムの開発

中赤外領域は左下図が示すように分子の指紋吸収線と呼ばれる吸収強度の強い遷移が多く存在し、基礎物理学だけでなく産業応用にも重要な波長域である。中赤外領域の中でも5–10 μm の長波長側は、質量の大きな分子の精密分光に適している。しかし、中赤外領域の長波長側では、精密分光に利用できる高性能な光源がほとんどない。そこで本研究では、周波数制御性に優れている波長1.5 μm 帯で発振するファイバーベースの光コムを種光とし、非線形結晶を用いた波長変換により中赤外領域の長波長側の光コムを発生させることを目指している。右下の写真は開発した1.5 μm の光コムを示す。レーザー共振器中に電気光学変調器、PZT素子を挿入しており、また銅板の下側にペルチェ素子を配置して温度制御ができるようになっている。これらのアクチュエーターを用いて共振器の長さ (f_{rep}) を制御することに成功した。また f_{ceo} 信号を $f2f$ 干涉計で検出し、レーザー共振器の励起レーザーの電流に制御信号をフィードバックすることで f_{rep} と同時に f_{ceo} 信号もそれぞれの基準信号に安定化した。さらに、レーザー共振器の出力を複数に分岐して、そのうちの一つの分岐でErファイバーアンプを構築し、中赤外発生に向けてパワー増幅した。



2.4 光共振器内分光に向けた共振器吸収セルの開発

分子分光において、その精密さを決める要素は光と分子のコヒーレントな相互作用時間である。一般に分光実験はセルに封入したガス分子を用いるが、実験の都合上、セルの長さには上限があり、せいぜい1 m程度である。高反射率ミラーで構成される光共振器とガスセルが一体化した共振器吸収セルを用いると、相互作用長が光共振器のフィネス倍されるので精密な分光実験が可能となる。また、光共振器は光コムとの相性が良く、光共振器のFSRと光コムの f_{rep} が一致するようにすると、光コムの全ての縦モードが光共振器に共鳴するようにできる。共鳴すると、共振器の腹で光電場が増強されるので、光コムは一つ一つの縦モードのパワーが小さいという欠点を補うことができる。本研究では、ステンレス製の共振器吸収セルを開発した。このセルはミラー取り付け部にベローズがあり、共振器長を2 cm程度粗調できるため、光コムの f_{rep} に合わせこむことができる。また、ガス封入口と排気口を設けており、任意の圧力のガスを封入することができるようになっている。

2.10 中村 信行 研究室

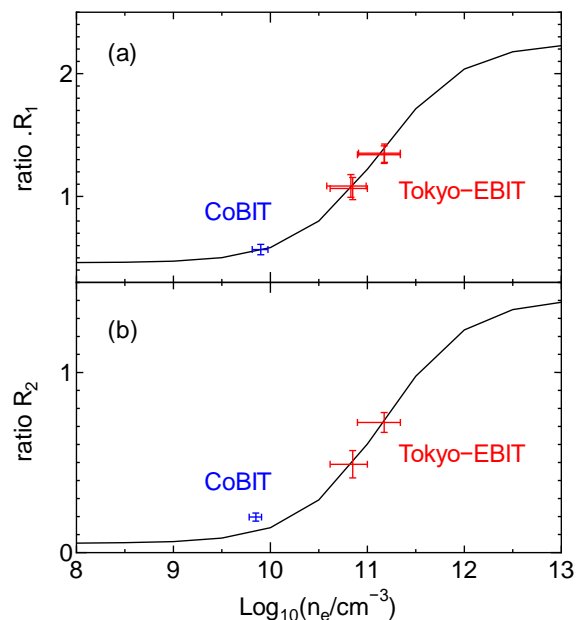
1. 研究の概略

当研究室では、電子をごく少数しか持たないような重元素イオンを生成可能な高エネルギー電子ビームイオントラップ（通称 Tokyo-EBIT）と、比較的価数の低いイオンを生成可能な小型電子ビームイオントラップ（通称 CoBIT）の2台の装置を主幹機器として、多価イオンの研究を行っている。多価イオンとは太陽コロナや熱核融合実験プラズマのような高温プラズマの主役であり、多価イオンに関する知見がそのようなプラズマの診断や制御に重要となる。そのため、核融合科学研究所や国立天文台との共同研究により、必要とされる多価イオンのデータ収集を行っている。また、微細構造定数の変動を敏感に検知する多価イオン原子時計の開発を目指し、理化学研究所他との共同研究により、時計構築のために有用なイオンや遷移の探索・同定を行っている。

2. 2020年度の研究活動報告（2020年4月～2021年3月）

2.1 太陽大気診断に有用な多価イオン遷移強度比の測定

観測衛星ひのなどでによる太陽コロナの分光診断においては、観測されたEUV領域の多価イオン発光線強度比を衝突輻射モデルによる理論計算と比較することで電子密度や電子温度分布などを導出する。しかし、衝突輻射(CR)モデルにおける遷移確率や速度係数は実験による十分な評価を受けていない理論値に依存することが多く、その精度が問題になることがある。我々の研究室では、実験室のよく定義されたプラズマにおいて得られるスペクトルにより衝突輻射モデルを評価することを目的として、電子ビームイオントラップ(Electron Beam Ion Trap : EBIT)を用いたEUV領域におけるスペクトルの観測を行っている。特に今年度は、太陽フレアの密度診断において重要とされるAr XIVのスペクトルを得た。実験では、広い電子密度に対する依存性を調べるため、高磁場仕様のTokyo-EBITと低磁場仕様の小型EBIT(CoBIT)を用いた。また、EUVスペクトルの観測と同時に、磁気双極子遷移による可視領域発光線の空間分布を調べることで、トラップイオンと電子ビームの空間的重なり因子を考慮した実効電子密度を求めた。実験で得られた(a)187.96Å/194.40Åおよび(b)243.79Å/257.37Åの輝線強度比の密度依存性を、Flexible Atomic Codeを用いたCRモデルによる結果と比較した結果、図に見られるように良い一致が得られた。



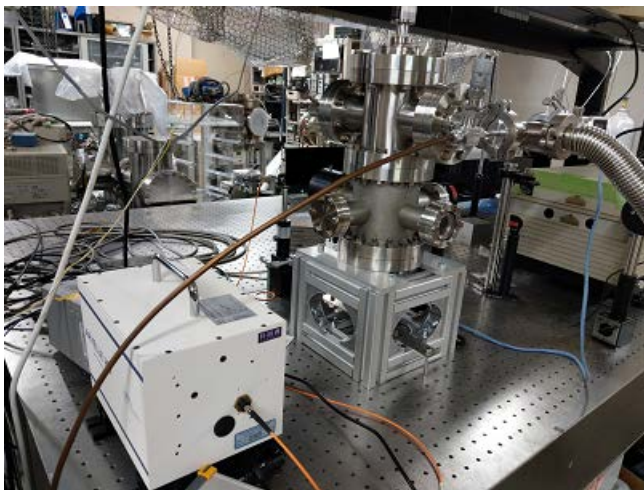
2.2 プラズマ内の長寿命準安定準位の振る舞いに関する研究

近年、プラズマ診断への応用を見据え、衝突輻射モデルを用いたシミュレーションによってプラズマ中イオンの発光を予測・再現する研究が、精力的に行われている。電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap: EBIT) が提供する良く定義された実験室プラズマは、そのモデル検証に有益な情報を与え、理論・実験の両面から発光過程への理解がより深まってきている。一方で、長寿命準安定準位が発光強度に

多大な影響を及ぼす例が最近複数報告され、プラズマ中における準安定準位の重要性が再認識された。また、長寿命準安定準位がプラズマ中の電離に大きく寄与する例も複数報告されている。プラズマ中イオンの価数制御は、近年活性化している極端紫外光源や原子時計などの多価イオン応用研究の基盤をなす技術である。そのため、長寿命準安定準位がプラズマ中の電離平衡に与える影響の詳細な検証は、非常に重要といえる。本発表では、複数の長寿命準安定準位を有する Ba^{8+} 、 Ba^{10+} を例にとり、小型EBITを用いて実際に観測した発光線強度の電子エネルギー依存性を踏まえて、長寿命準安定準位がプラズマ中イオンの電離平衡に与える特異性に関して研究した。

2.3 遷移確率の導出を目的としたレーザー誘起ブレイクダウン分光分析

中性子星合体において重元素が合成されていることが近年の研究で明らかになってきている。その確証を得るためには、合体により放出される電磁波観測を行い、そのスペクトルや発光強度の経時変化を、放射輸送モデル計算と比較する必要がある。放射輸送計算では様々な重元素の束縛－束縛遷移データが必要となるが、現存しない遷移確率データの取得、および現存する理論データの実験による検証を目的として、レーザー誘起ブレイクダウン分光分析装置を立ち上げた。今年度はエルビウムイオンについて観測を行い、米国標準技術研究所（NIST）の原子スペクトルデータベースに掲載されている遷移確率データの検証を行った。また、より広い波長範囲を同時に観測可能なように、広帯域のエシエル分光器を導入した（写真左手前が導入した分光器、中央は標的チェンバー、奥がレーザー）。



2.4 多価イオンの発光線の観測・同定

超微細構造定数 α 変動の検知や国際熱核融合実験炉（ITER）のプラズマ診断において、多価イオンの可視域発光データが求められている。必要とされるデータの中で4fを最外殻に持つようなイオンがしばしば重要となるが、4f開殻構造による複雑なエネルギー準位の正確な理論計算は困難なため、実験による波長決定や遷移同定が必要となっている。我々は以前、4f開殻構重元素イオンの中でも単純な構造を持つAg様(4f¹)及びCd様(4f²)の等電子系列について発光線の観測と同定を行った。今年度においては、4f電子の数がさらに増えることでより複雑な構造を持つIn様(4f³)及びSn様(4f⁴)イオンの可視域発光線を、W (Z=74)、Re (Z=75)、Os (Z=76)の3元素について観測した。エネルギー依存性を観測することにより、それぞれの価数からの発光線であることを確認した。

3. 外部発表のリスト (2020年4月～2021年3月の期間に発表されたもの)

3.1 論文発表 原著論文(査読有)

- (1) S.Kawamura, M.Ando, S.Sato, M.Musha et.al. , Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO, Progress on Theoretical and Experimental Physics, 05A105 (2021).
- (2) Henrik Tünnemann and Akira Shirakawa, Deep Reinforcement Learning for Tiled Aperture Beam Combining in a Simulated Environment, J. Phys: Photonics vol. 3, no.1, 015004 (2021).
- (3) A. Suzuki, C. Kränkel and M. Tokurakawa, “High quality-factor Kerr-lens mode-locked Tm:Sc₂O₃ single crystal laser with anomalous spectral broadening,” Applied Physics Express 13, 052007 (2020).
- (4) Hikaru Tamura, Tomotake Yamakoshi, and Ken’ichi Nakagawa, Analysis of coherent dynamics of a Rydberg-atom quantum simulator, Physical Review A 101, 043421 (2021).
- (5) Xiaobin Ding, Fengling Zhang, Yang Yang, Ling Zhang, Fumihiro Koike, Izumi Murakami, Daiji Kato, Hiroyuki A. Sakaue, Nobuyuki Nakamura, and Chenzhong Dong, Collisional-radiative modeling of the 5p -5s spectrum of W xiv–W xvi ions, Phys. Rev. A 101, 042509 (2020).
- (6) Naoki Kimura, Ryunosuke Kodama, Priti, Naoki Numadate, Kento Suzuki, Masashi Monobe, and Nobuyuki Nakamura, 5p–4f level crossing in palladium-like ions and its effect on metastable states, Phys. Rev. A 102, 032807 (2020).
- (7) Q. Lu, C. L. Yan, G. Q. Xu, N. Fu, Y. Yang, Y. Zou, A. V. Volotka, J. Xiao, N. Nakamura, and R. Hutton, Direct measurements for the fine-structure splitting of S viii and Cl ix, Phys. Rev. A 102, 042817 (2020).
- (8) Priti, Momoe Mita, Daiji Kato, Izumi Murakami, Hiroyuki A. Sakaue, and Nobuyuki Nakamura, Identification of visible lines from multiply charged W8+ and W9+ ions, Phys. Rev. A 102, 042818 (2020).
- (9) Satoshi Takahashi, Masahide Tona, Nobuyuki Nakamura, Chikashi Yamada, Makoto Sakurai, Shunsuke Ohtani, Highly sensitive detection of adsorbed on Si(111)7X7 and Si(100)2X1 surfaces by means of slow highly charged Xe ions, Surface Science 707, 121785 (2020).

3.2 国際会議プロシーディングス

- (1) Tomonari Kawamura and Akira Shirakawa, Phase-locked and mode-locked multicore photonic crystal fiber laser with a saturable absorber, Proc. SPIE 11665, 116651N (2021).
- (2) Development of an all PM mode lock fiber laser for space borne frequency reference, Yuichi Takeuchi, Ryota Saito, Shun Endo, Kana Matsusaka, Mitsuru Musha, Proc. SPIE 11852, 118523O (2021). 7 月
- (3) Laser-based satellite positioning system for space gravitational wave detector DECIGO, Proc. SPIE 11852, 118524O (2021). 7 月
- (4) S.Das, H.Ohashi, and N.Nakamura, Interactions of slow highly charged Bismuth ions with highly oriented pyrolytic graphite surface, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B 478, 163 (2020).

3.3 解説論文, 紹介記事, 報告書等

- (1) 川村朋稔、白川晃, 「可飽和吸収体による位相同期モード同期マルチコアフォトニック結晶ファイバ

- ーレーザー」，レーザー学会第548回研究会報告「ファイバーレーザー技術」，RTM-20-19 (2020).
- (2) 戸倉川正樹、鈴木杏奈、矢津田匠海、レーザー加工のための波長2 μ m帯短パルスTmレーザー光源の開発、レーザー加工学会誌 28巻、3-8 (2021).
- (3) 中川賢一、次世代量子慣性センサー、量子センシングハンドブック 監修 根来 誠、(株)エヌ・ティー・エス、p.193-p203、2021年3月.

3.4 博士論文，修士論文，卒業論文

- (1) 修士論文「赤外域における CO₂ ガスの吸収スペクトルに関する研究」、山崎 晃平、2021 年 3 月
- (2) 修士論文「金属レーザー加工におけるその場計測手法の研究」、山本 拓磨、2021 年 3 月
- (3) 修士論文「レビテーションを用いた高出力レーザーと物質との相互作用に関する研究」、神山美理、2021 年 3 月
- (4) 卒業論文「周波数干渉計を用いたレーザー加工深さ計測システムの開発」、杉浦 成海、2021 年 3 月
- (5) 卒業論文「波面及び時間チャープ制御による非線形レーザー加工の最適化」、吉田 侃生、2021 年 3 月
- (6) 修士論文「Yb 添加マルチコアファイバー増幅の研究」、WEN QUANYING (文全営)、2020 年 9 月
- (7) 修士論文「可飽和吸収体による位相同期モード同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー」、川村朋稔、2021 年 3 月
- (8) 修士論文「モード同期 Yb:CaF₂ 単結晶 thin-disk レーザーの研究」、鈴木優哉、2021 年 3 月
- (9) 卒業論文「マルチモードファイバーレーザーにおける能動モード同期によるモード選択の研究」、大西志晶、2021 年 3 月
- (10) 修士論文「マルチモード高出力緑色半導体レーザーのモード制御とビーム結合」、校條健太、2021年3月
- (11) 卒業論文「マルチモード青緑色半導体レーザーの不安定共振器によるモード制御」、吉田知仁、2021年3月
- (12) 修士論文「高安定マイクロ波基準発生のための光コムの開発」、齋藤瞭太、2021年3月
- (13) 修士論文「マイクロECLDを用いた自動位同期システムの開発」、伊藤航平、2021年3月
- (14) 修士論文「515nm高安定高出力光源」、濱口太一、2021年3月
- (15) 卒業論文「重力波検出に用いるヨウ素安定化レーザーの残留振幅変調の抑制」、加藤佑一、2021年3月
- (16) 卒業論文「堅牢な光周波数コムのための全偏波保持figure-8モード同期レーザーの開発」、栗原大周、2021年3月
- (17) 卒業論文「音響光学素子を用いた精密測角による衛星間長距離相対測位」、田尻美佳、2021年3月
- (18) 修士論文「Tm添加分散設計シリカファイバーを用いた波長2 μ m帯モード同期発振器の開発とその高出力化」、佐藤匠、2021年3月
- (19) 修士論文「Tm添加ダブルクラッドフッ化物ファイバーを用いたMamyshev発振器の開発」、内園裕也、2021年3月
- (20) 卒業論文「中赤外Cr²⁺:ZnSe/ZnS遷移金属レーザーの開発」、三井峻平、2021年3月

- (21) 卒業論文「スラブ型 $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックを用いたレーザー共振器の開発」、多田遼太郎、2021年3月
- (22) 修士論文「原子干渉計を用いた重力加速度計のための可搬型レーザーシステムの開発」、石川 悠、2020年3月
- (23) 修士論文「トランスファー共振器を用いたRb原子Rydberg状態励起用レーザーの開発」、奥野 央志、2020年3月
- (24) 修士論文「原子干渉計を用いた重力加速度計のための冷却原子生成システムの開発」、羽石 暁、2020年3月
- (25) 卒業論文「トランスファー共振器を用いた波長1013nmレーザーの周波数安定化」、石橋 裕生、2020年3月
- (26) 卒業論文「原子干渉計のための周波数基準レーザーの開発」、北条 孟、2020年3月
- (27) 修士論文「少数光子非線形光学効果観測に向けた冷却原子集団の作製」、高山 泰征、2021年3月
- (28) 修士論文「少数光子非線形光学効果観測に向けた光共振器の設計と評価」、田中 貴大、2021年3月
- (29) 修士論文「リュードベリ原子を用いた高効率な単一光子発生に向けた光源開発」、茂木 康伸、2021年3月
- (30) 卒業論文「 ^{39}K 原子による高フィネス光共振器の安定化に向けた光源の構築」、石井 勇輔、2021年3月
- (31) 卒業論文「単一光子源の性能評価のための光子統計評価システムの開発」、岡嶋 宗裕、2021年3月
- (32) 卒業論文「電磁場誘起透明化を用いた ^{87}Rb のリュードベリ状態の観測」、増田 晴美、2021年3月
- (33) 卒業論文「単一光子伝送実現のためのテーパードファイバーの作製と評価」、相馬康人、2021年3月
- (34) 卒業論文「CO₂レーザーによるテーパ状光ファイバーチップの加工」、齊藤樹征、2021年3月
- (35) 修士論文「遷移確率の測定を目的としたランタノイドイオンのレーザー誘起ブレイクダウン分光分析」、直井祐樹、2020年3月
- (36) 修士論文「鉄多価イオン発光線の電子密度依存性について」、細谷征由、2020年3月
- (37) 卒業論文「電子ビームイオントラップの電子ビーム軌道計算」、早乙女京吾、2020年3月

3.5 国際会議 発表

- (1) Tomonari Kawamura and Akira Shirakawa, “Mode-locked fiber laser aiming to phase-locked multicore fiber laser,” 9th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS '20), paper ALPS-1-04, online, Apr. 22, 2020.
- (2) Henrik Tünnermann and Akira Shirakawa, “Tiled aperture beam combining with reinforcement learning,” CLEO 2020, paper SM1L.2, online, May 11, 2020.
- (3) Tomonari Kawamura and Akira Shirakawa, “Phase-locked and mode-locked multicore photonic crystal fiber laser with saturable absorber,” Photonics West 2021-LASE, paper 11665-55, online, Mar. 6-11, 2021.
- (4) Y. Takeuchi, E. Kajikawa, T. Ishii, K. Ogawa, M. Musha, ‘Stable operation of a high-power $\text{Tm}^{3+}:\text{ZBLAN}$ fiber MOPA at 813 nm, Europhoton2020 2020/09

- (5) A. Suzuki, C. Kränkel, and M. Tokurakawa, Kerr-lens mode-locked $\text{Tm}^{3+}:\text{RE}_2\text{O}_3$ (RE=Lu, Sc) lasers, Proceedings of ALPS2020, ALPS3-03 (2020).
- (6) N. Kikuchi, A. Suzuki, M. Tokurakawa, 1650 nm broad-stripe diode in-band pumped $\text{Tm}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ ceramic laser, Proceedings of ALPS2020 ALPSp16 (2020).
- (7) K. Iwakuni, "Absolute frequency measurement of N_2O at $1.52\mu\text{m}$ ", The 4th Asian Workshop on Molecular Spectroscopy, B27, 2021/3/10.
- (8) N. Nakamura, Breit interaction effects on recombination processes of highly charged ions, AAMOS20: Advances in Atomic, Molecular, and Optical Sciences (online) 2020/12/17 (Invited)

3.6 国内会議（学会，シンポジウム，ワークショップ，研究会等）

- (1) 柴田崇統, 原田寛之, サハ プラナブ クマル, 金正倫計, 米田仁紀, 道根百合奈, 湊葵, 佐藤篤, レーザー荷電変換による 400 MeV H^0 原子からの Doppler シフト Balmer 分光測定装置の開発・校正, 日本物理学会 第 76 回年次大会、14aX1-3 2021 年 3 月 14 日
- (2) 湊葵, 道根百合奈, 米田仁紀, 原田寛之, サハプラナブ クマル, 佐藤篤, 柴田崇統, 金正倫計, 大強度陽子加速器におけるレーザー荷電変換実験用レーザー装置開発, 日本物理学会 第 76 回年次大会、14aX1-2 2021 年 3 月 14 日
- (3) 原田寛之, サハプラナブ, 米田仁紀, 道根百合奈, 湊葵, 佐藤篤, 柴田崇統, 金正倫計, 大強度陽子加速器におけるレーザー荷電変換実験. 日本物理学会 第 76 回年次大会、14aX1-1 2021 年 3 月 14 日
- (4) 米田仁紀, 道根百合奈, 湊葵, 犬伏雄一, 矢橋牧名, 進行波励起定在波型ハード X 線レーザーの動作原理の研究, 日本物理学会 第 76 回年次大会、13aB1-6 2021 年 3 月 14 日
- (5) 道根百合奈, 米田仁紀, 真空環境下でのオゾン混合ガス回折レンズの研究, 日本物理学会 第 76 回年次大会、13aB1-5 2021 年 3 月 14 日
- (6) 米田仁紀, 定在波型ハード X 線レーザーの研究、レーザー学会第 41 回学術講演会、S04-20p-III-05、2021 年 1 月 20 日（シンポジウム、招待講演）
- (7) 道根百合奈, 米田仁紀, 紫外レーザー光励起オゾン混合ガス回折光学素子の開発, レーザー学会第 41 回学術講演会、B04-18p-II-03、2021 年 1 月 18 日（招待講演）
- (8) 米田 仁紀、道根 百合奈、湊 葵、高信頼性光学ミラー開発を目指した長時間ミラー耐力試験、レーザー学会第41回学術講演会、B04-18p-II-04、2021年1月18日
- (9) 湊 葵、道根 百合奈、米田 仁紀、原田 寛之、サハプラナブ クマル、佐藤 篤、柴田 崇統、金正 倫計、J-PARC レーザー荷電変換用レーザーシステムの開発、レーザー学会第 41 回学術講演会、B07-20a-II-04、2021 年 1 月 20 日
- (10) 文全 営、白川 晃：「Yb 添加マルチコアフォトニック結晶ファイバーによるファイバー増幅」、第 81 回応用物理学会秋季学術講演会、8a-Z19-8, online, 2020 年 9 月 8 日.
- (11) 川村 朋稔、白川 晃：「可飽和吸収体による位相同期モード同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー」、レーザー学会第 548 回研究会「ファイバーレーザー技術」、オンライン、2020 年 11 月 27 日.
- (12) 杉本 洸太、白川 晃：「チャープパルス増幅および分割パルス増幅による高エネルギー超短パルスの発

- 生とその位相特性」, レーザー学会第 548 回研究会「ファイバーレーザー技術」, オンライン, P2, 2020 年 11 月 27 日.
- (13) 中村聡、白川晃：「カーレンズモード同期 Yb:CaF₂ 超短パルスレーザーの開発」, 第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会, オンライン, P3, 2020 年 12 月 11 日.
- (14) 川村朋稔、白川晃：「可飽和吸収体による位相同期モード同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー」, 第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会, オンライン, P4, 2020 年 12 月 11 日.
- (15) 杉本洸太、白川晃：「分割パルスファイバー増幅およびチャープパルス増幅による高エネルギー超短パルスの発生とその結合効率」, 第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会, オンライン, P5, 2020 年 12 月 11 日.
- (16) 鈴木優哉、白川晃：「モード同期 Yb:CaF₂ 単結晶 thin-disk レーザーの研究」, 第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会, オンライン, P6, 2020 年 12 月 11 日.
- (17) 川村朋稔、白川晃：「可飽和吸収体による位相同期モード同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー」, レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会, B01-18a-II-05, オンライン, 2021 年 1 月 18 日.
- (18) 杉本洸太、白川晃：「チャープパルス増幅および分割パルス増幅による高エネルギー超短パルスの発生とその位相特性」, レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会, B06-19p-II-07, オンライン, 2021 年 1 月 19 日.
- (19) 中村聡、鈴木優哉、白川晃：「Yb 添加 CaF₂ 結晶を用いたモード同期レーザーの開発」, レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会, B09-20p-II-04, オンライン, 2021 年 1 月 20 日.
- (20) 鈴木優哉、白川晃：「Yb:CaF₂ 単結晶 thin-disk レーザーの開発」, レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会, B09-20p-II-05, オンライン, 2021 年 1 月 20 日.
- (21) 竹内 裕一、齋藤 瞭太、遠藤 駿、栗原大周、武者 満「衛星搭載に向けた光周波数コムのための Figure-8 モード同期ファイバーレーザー」 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 2021 年 3 月
- (22) 遠藤 駿、竹内 裕一、齋藤 瞭太、栗原大周、武者 満「光を用いた衛星搭載精密マイクロ波発生装置」 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 2021 年 3 月
- (23) 田尻美佳、濱口太一、竹内 裕一、武者 満「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(128): レーザーを用いた衛星捕捉システム」 日本物理学会第 75 回年次大会 2021 年 3 月
- (24) 齋藤 瞭太、竹内 裕一、遠藤 駿、武者 満「精密マイクロ波発生用ファイバーコムのための Figure-8 レーザーの特性評価」 レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会 2021 年 1 月
- (25) 竹内 裕一、齋藤 瞭太、遠藤 駿、武者 満「光周波数基準を用いた衛星搭載精密マイクロ波発生装置の開発」 レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会 2021 年 1 月
- (26) 長谷川丈紘、田尻美佳、竹内裕一、武者満「レーザーを用いた衛星間測角・測距技術」 第 64 回宇宙科学技術連合講演会 2020 年 10 月
- (27) 齋藤瞭太、遠藤駿、竹内裕一、武者満「光を用いた精密マイクロ波周波数基準の開発」 第 64 回宇宙科学技術連合講演会 2020 年 10 月
- (28) 濱口太一、長谷川丈紘、田尻美佳、大塚俊介、武者満「スペース重力波アンテナDECIGO計画(122): 高出力安定化光源と衛星捕捉システム」 日本物理学会2020秋季大会 2020年9月
- (29) 田尻美佳 武者満「AOD による衛星捕捉システムの開発状況」 第 19 回 DECIGO-Workshop 2020 年 11

月

- (30) 鈴木 杏奈、Christian Kränkel、戸倉川 正樹、Tm:RE₂O₃(RE=Lu, Sc)複合利得媒質を用いたカーレンズモード同期レーザーによる サブ 9 サイクルパルス 発生、2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会 19a-z11-10 2021 年 3 月 19 日
- (31) 内園 裕也、佐藤 匠、Chen Yuhao、Sidharthan Raghuraman、Woo Seong Yoo、戸倉川 正樹、波長 2 μm 帯正常分散 Tm ファイバーを用いたモード同期レーザーの開発、2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会 16p-Z11-10 2021 年 3 月 19 日
- (32) 菊地音、鈴木杏奈、戸倉川正樹、波長 1650 nm LD 励起 Tm:Lu₂O₃ セラミックレーザーの開発、レーザー学会 第 41 回年次大会 B09-20p-II-03 2021 年 1 月 20 日
- (33) 佐藤 匠、Yuhao Chen、Raghuraman Sidharthan、Seong Yoo、戸倉川 正樹、Tm 添加分散設計シリカファイバーを用いたストレッチパルスモード同期レーザーの開発 レーザー学会 第 41 回年次大会 B06-19p-II-02、2021 年 1 月 19 日
- (34) 鈴木 杏奈、Kränkel Christian、戸倉川 正樹学会、Tm 添加媒質を用いた複合利得発振器 レーザー学会 第 41 回年次大会 B05-19p-II-05、2021 年 1 月 19 日
- (35) 矢津田匠、原田有生、戸倉川正樹、ns パルス Q スイッチ Tm ファイバーレーザー、レーザー学会 第 41 回年次大会、P01-19a-P-04、2021 年 1 月 19 日
- (36) 鈴木杏奈、Christian Keankel、戸倉川 正樹、Tm 添加複合利得媒質を用いたカーレンズモード同期レーザー、第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会、P1、2020 年 12 月 11 日
- (37) 佐藤 匠、Yuhao Chen, and R. Sidharthan, Seongwoo Yoo, 戸倉川 正樹、分散設計 Tm 添加シリカファイバーを用いた 0 分散近傍での非線形偏波回転モード同期レーザーの開発、第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会、P3、2020 年 12 月 11 日
- (38) 矢津田 匠海、原田有生、戸倉川 正樹、非線形散乱フィードバックを用いたサブ 100 μJ ナノ秒 Tm ファイバーレーザー、レーザー学会ファイバーレーザー技術専門委員会、P3、2020 年 11 月 27 日
- (39) 佐藤 匠、Yuhao Chen, and R. Sidharthan, Seongwoo Yoo, 戸倉川 正樹、分散制御 Tm 添加シリカファイバーを用いた 0 分散近傍での非線形偏波回転モード同期レーザーの開発、レーザー学会ファイバーレーザー技術専門委員会、P10、2020 年 11 月 27 日
- (40) 奥野央志、吉田佑策、石橋裕生、中川賢一、トランスファー共振器を用いた Rb 原子の Rydberg 状態励起用レーザーの開発、日本物理学会第 76 回年次大会、2020 年 3 月 14 日
- (41) 石川悠、羽石暁、山崎智樹、北条孟、中川賢一、原子重力加速度計のためのレーザーシステムの開発、日本物理学会第 76 回年次大会、2020 年 3 月 14 日
- (42) 羽石暁、石川悠、山崎智樹、北条孟、中川賢一、原子干渉計を用いた可搬型重力加速度計に向けた小型センサーヘッドの開発、日本物理学会第 76 回年次大会、2020 年 3 月 14 日
- (43) 森永実、相馬康人、齊藤樹征、微小発光体と結合する光ファイバーチップの最適形状とその製作、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 14 日
- (44) 高橋唯基、桃原怜央、岩國加奈、久間晋、宮本祐樹、「バッファガス冷却された多原子分子源の研究開発」、日本物理学会、12aA1-2、2021年3月12日
- (45) 高橋亜稀、岩國加奈、「新奇デュアルコム分光計の開発に向けたモード同期ファイバーコムの開発」、第21回分子分光研究会、L02、2021年3月8日

- (46) 宮本祐樹、久間晋、岩國加奈、「気相分子冷却に向けたアブレーション生成物のバッファーガス冷却とその分光」、日本物理学会、10aA2-7、2020 年 9 月 10 日
- (47) 岩國加奈、中赤外ダイレクト光コム分光（招待講演）、第 4 回精密計測をもとに科学技術に変革をもたらす回路技術調査専門委員会、2020 年 7 月 16 日
- (48) 恵良彰太、梅崎智暉、坂上裕之、村上泉、中村信行、加藤太治、核融合プラズマ研究への利用に向けたタングステン多価イオンの紫外可視磁気双極子線の同定、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 21 日
- (49) 中村信行、二電子性再結合 X 線の偏光度測定、2020 年合同素過程研究会、2020 年 12 月 17 日
- (50) 河野泰隆、沼館直樹、大野望海、坂上裕之、加藤太治、村上泉、原弘久、中村信行、電子ビームイオントラップによる多価イオン EUV スペクトル強度比の電子密度依存性、2020 年合同素過程研究会、2020 年 12 月 17 日
- (51) 岩田 昌幸、直井 祐樹、田中 雅臣、和南城 伸也、関口 雄一郎、Gediminas Gaigalas、坂上 裕之、加藤 太治、村上 泉、田沼 肇、中村信行、遷移確率の測定を目的としたランタノイドイオンのレーザー誘起ブレイクダウン分光分析 II、原子衝突学会第 45 回年会、2020 年 12 月 8 日
- (52) 直井 祐樹、岩田 昌幸、田中 雅臣、和南城 伸也、関口 雄一郎、Gediminas Gaigalas、坂上 裕之、加藤 太治、村上 泉、田沼 肇、中村信行、遷移確率の測定を目的としたランタノイドイオンのレーザー誘起ブレイクダウン分光分析 I、原子衝突学会第 45 回年会、2020 年 12 月 8 日
- (53) 河野 泰隆、坂上 裕之、寺崎 義朗、柳 長門、中村 信行、電子ビームイオントラップ用無絶縁高温超伝導コイルの評価、原子衝突学会第 45 回年会、2020 年 12 月 8 日
- (54) 木村 直樹、Priti、児玉 龍之介、沼館 直樹、中村 信行、長寿命準安定準位がプラズマ中の電離平衡に与える特異性、原子衝突学会第 45 回年会、2020 年 12 月 8 日
- (55) 佐々木 康、物部 将士、中村 信行、坂上 裕之、村上 泉、加藤 太治、強制非平衡イオン発光計測による多価イオンの電子衝突電離断面積の実験的評価、原子衝突学会第 45 回年会、2020 年 12 月 8 日
- (56) Pipatpakorn Pativate、中村信行、Sn 様及び In 様多価イオンにおける可視領域発光線の観測、原子衝突学会第 45 回年会、2020 年 12 月 8 日
- (57) Priti, Daiji Kato, Izumi Murakami, Hiroyuki A. Sakaue, Nobuyuki Nakamura, EUV Transitions in Highly Charged W6+ -W13+ Ions Observed with an Electron Beam Ion Trap, 原子衝突学会第 45 回年会、2020 年 12 月 8 日
- (58) 佐々木康、物部将士、中村信行、坂上裕之、村上泉、加藤太治、強制非平衡イオン分光による重元素多価イオンの電子衝突電離断面積測定を試み、プラズマ・核融合学会 第 37 回年会、2020 年 12 月 3 日
- (59) Priti, Naoki Kimura, Ryunosuke Kodama, Naoki Numadate, Nobuyuki Nakamura, Analysis of the energy dependence of the emission lines in Rh⁺ to Cd-like ions through CR Modeling, 日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 8 日
- (60) 直井祐樹、田中雅臣、和南城伸也、関口雄一郎、Gediminas Gaigalas、坂上裕之、加藤太治、村上泉、田沼肇、中村信行、遷移確率の測定を目的としたエルビウムイオンのレーザー誘起ブレイクダウン分光分析、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 8 日

3.7 表彰

- (1) 鈴木杏奈、Tm添加複合利得媒質を用いたカーレンズモード同期レーザー、第5回超高速光エレクトロニクス研究会 ポスター発表学生賞 P1 2020/12/11
- (2) 鈴木杏奈、Tm添加媒質を用いた複合利得発振器、レーザー学会 第41回年次大会 発表奨励賞 B05-19p-II-05 2021/01/19

電気通信大学 レーザー新世代研究センター 年次報告書(令和2年度)
2021年11月 発行
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1
TEL: 042-443-5711 FAX: 042-485-8960
<http://www.ils.uec.ac.jp/jindex.html>