

経済
月報

MONTHLY REPORT 2020

December

12

No.613

特集

未来を描く、小型集積レーザー
自然科学研究機構分子科学研究所
社会連携研究部門

特任教授 **平等 拓範** 氏

この人に聞く

認定 NPO 法人
ベトナム簿記普及推進協議会
理事長 **大武健一郎** 氏

ビジネスインタビュー

熱を知り、熱を操る。
メトロ電気工業株式会社

小型高出力テラヘルツ波光源の
実用化研究を推進。

Kei Takeya, Ph.D.
Team Leader
チームリーダー 博士(理学)
竹家 啓 氏

表面活性接合技術による新構造
(DFC) 超小型レーザーの開発。

Arvydas Kausas, M.S.
Project Researcher
特任研究員
Arvydas Kausas 氏

異方性セラミックスの開発で
前人未達のレーザーを開発。

Yoichi Sato, Ph.D.
Visiting Researcher
特別訪問研究員 博士(理学)
佐藤 庸一 氏

高強度パルスレーザーの
研究開発と応用。

Hwan Hong Lim, Ph.D.
Project Researcher
特任研究員 博士
Hwan Hong Lim 氏

わたしたちが、世界を先導する。

XFEL と高出力レーザーのユビキタス化
を目指しチームを牽引。

Yuji Sano, Ph.D.
Program Manager
プログラム・マネージャー 博士(工学)
佐野 雄二 氏

マイクロ固体フォトリソを提唱する
超小型レーザー開発の第一人者。

Takunori Taira, Ph.D.
Project Professor
特任教授 博士(工学)
平等 拓範 氏

超小型レーザーを高出力化
するパワーアンプの研究。

Vincent Yahia, Ph.D.
Project Researcher
特任研究員 博士
Vincent Yahia 氏



疑似位相整合技術による世界最先端の波長変換
デバイスを開発。

Hideki Ishizuki, Ph.D.
Visiting Researcher
特別訪問研究員 博士(工学)
石月 秀貴 氏



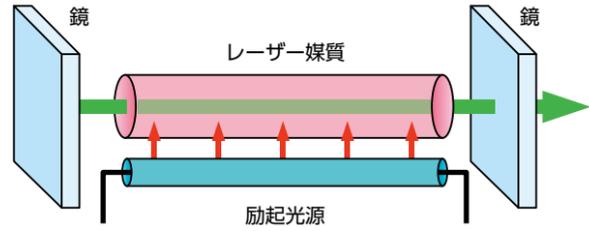
高強度パルスレーザーの開発と電子加速への
応用開発を推進。

Akihiro Tsuji, Ph.D.
Visiting Researcher
特別訪問研究員 博士(工学)
辻 明宏 氏

レーザー超小型化最前線

レーザーの超小型化・集積化に成功した分子科学研究所の平等拓範特任教授。
マイクロチップレーザーは、日本の産業界とわたしたちの未来にどのようなインパクトを与えるのか。
現状と今後の展開についてお話をうかがった。

■ レーザーの基本構造



発生したレーザー光は反射鏡の間を何回も往復させることで増幅し、特性が揃った強力な光となって放出される。

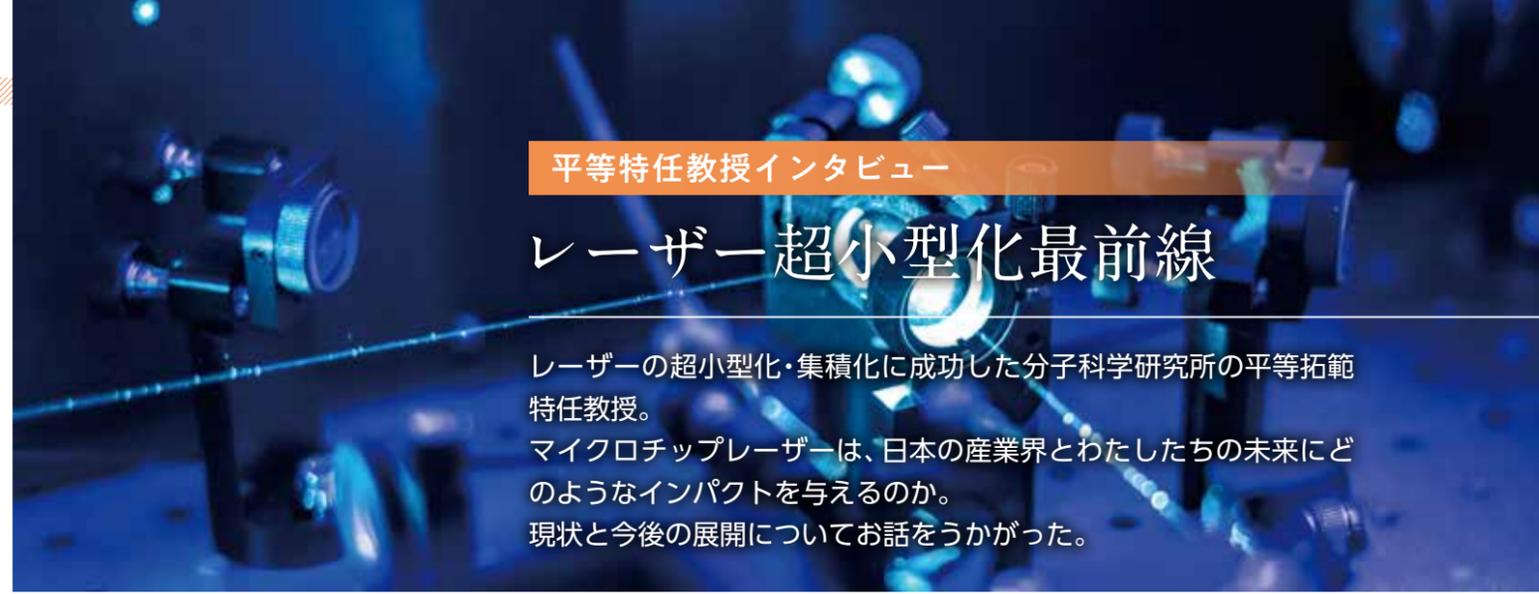
定なので、すぐに電子はエネルギー状態の低い元の軌道に戻ろうとします。
このとき、エネルギーバランスを保つために、原子から光が放出されます。これを「自然放出」と呼びます。アインシュタインは無秩序に起こる自然放出光のほかにも、誘導放出光が存在するという概念を提唱しました。
アインシュタインの誘導放出の理論は、レーザー光発振の基礎と

なるものです。誘導放出の概念に従えば、光は増幅できます。
一個の光を次々にコピーして増幅し、拡散しにくく遠方まで届きやすい性質を持った光に変えることができる装置がレーザーです。
レーザーの発明
アインシュタインの理論を基に、多くの研究者たちがレーザー開発に取り組みました。特筆すべきはタウンズとメイマンです。
タウンズは、レーザーとレーザーの基礎研究などの業績が認められ、1964年にノーベル物理学賞を受賞しました。そして、初めてレーザーを作ったのが米国の物理学者メイマンです。
1960年、メイマンは人工ルビーに光を照射して、波長と位相がきれいにそろったコヒーレント光（波動が干渉し合って増幅しないし減衰する光）を発振することに成功しました。世界初のレーザーの誕生です。
そのルビーレーザー発明を皮切りに、レーザー開発は世界中で急激に進み、気体や液体、半導体な

無尽蔵なパワー
レーザーの実用範囲
レーザーは、製造業から、医療分野まで幅広く使えます。テラヘルツ波による非破壊透視なども、いま急速に進んでいる分野です。
光のエネルギーを集めれば、核融合も可能とも言われています。実際、米カリフォルニア州ローレンスリバモア国立研究所内にある世界最大のレーザー核融合施設NIF（国立点火施設）や大阪大学レーザー科学研究所などは、レーザーを使った核融合の実験を行っています。

電流が流れたりする「光電効果」は、波動説ではうまく説明がつかせませんでした。
この難題に対し、アインシュタインが見事に答えを出しました。「光は波と粒子の性質をあわせ持つ、フォトン（光子）である」
アインシュタインは、この光量子仮説でノーベル物理学賞を受賞します。
レーザーのきっかけを作ったのもアインシュタインでした。

レーザーの登場
原子を中心に原子核があって、その周りを電子が取り巻いています。普段は基底状態という安定状態（低いエネルギー状態）にあります。そこに光などのエネルギーで刺激を与えると、電子は外側の軌道に移り、エネルギー状態が高まります。これを「励起状態」といいます。励起状態は非常に不安



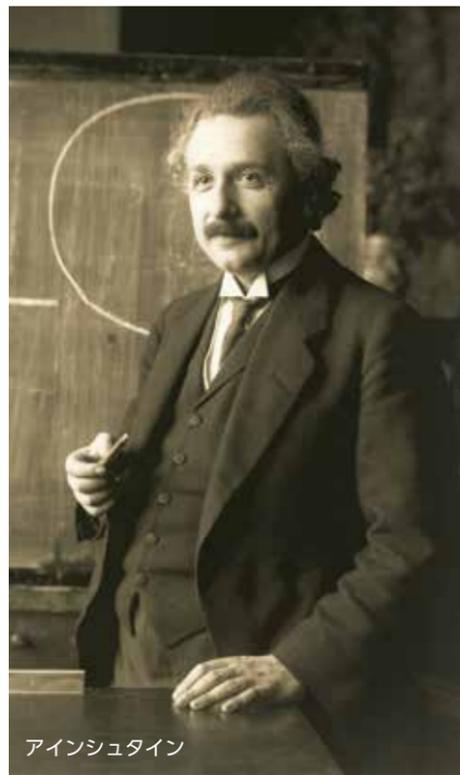
PART I レーザーの発明

光とは何か

光の本質
光がエネルギーだということはご存知だと思います。レンズで太陽の光を集めると紙が燃えます。これは、光を集めれば強いエネルギーになるという身近な例です。太陽から射す光がなかったら農作物は育ちません。生きとし生けるものは、すべて光の賜物なのです。人間は太古の昔からそのことを知っていて、自分たちにとって欠かせないものという認識を持っていました。

光の研究

光が何であるか。昔から研究されてきました。光の本質を問う論争が長きにわたり、科学者の間で続けられ、「光は波である」という仮説が主流となっていきます。
しかし、物質に光を当てると、物質の中の電子が飛び出したり、



レーザーの登場

アインシュタインの論文

原子は中心に原子核があって、その周りを電子が取り巻いています。普段は基底状態という安定状態（低いエネルギー状態）にあります。そこに光などのエネルギーで刺激を与えると、電子は外側の軌道に移り、エネルギー状態が高まります。これを「励起状態」といいます。励起状態は非常に不安

PART2 「マイクロ固体フォトリクス」の提唱

小型化で光革命を

レーザー研究のきっかけ

レーザーの研究者になる前、企業でエレクトロニクスの研究・開発をしていました。1984年には、コンピュータをいつでもどこでも誰もが使えるものにしよという東京大学の坂村先生のTRONプロジェクトに参加。わたしはメモリなどの開発に励みました。

当時開発した小型コンピュータをネクタイピンにしたものを持っています。今となつては幻のトロンチップです。

1980年代後半になると日米半導体摩擦が起こり、日本の半導体、コンピュータサイエンス研究は、今後厳しいかもしれないと思ひ、1989年に専門を光（フォトリクス）に変更。アカデミックの世界に戻ることにしました。

レーザー小型化のヒント

レーザーの世界に入つて、はじめに思ったことは、固体レーザーを小さくしたら、何か面白いことが起きるのではないか、ということでした。

以前、わたしが研究していたエレクトロニクスの世界では、真空管が進化し、トランジスタが生まれました。さらにトランジスタが集積して集積回路（IC）・大規模集積回路（LSI）となりました。



80年代に企業で開発した超小型コンピュータトロンチップ（タイピンの飾り部分）



手のひらサイズの小型集積レーザー

た。そして、専門家だけのものだった大型コンピュータがマイクロチップ化され、情報革命が起こつたのです。

これと同じことを光の世界でも起こせないか。レーザーの小型・集積化による光革命。わたしの今日までの研究の根幹をなす、マイクロ固体フォトリクスの始まりです。

研究の方向性

研究の方向性としては、高性能マイクロチップレーザーの開発と、それに適した次世代材料の具体化が中心です。

高出力・高エネルギーを実現できるマイクロレーザーを作るためには、ハイパワーに耐える高性能な次世代材料が必須です。その最有力素材がセラミクス。セラミクスであれば均質な材料を量産することが可能になります。

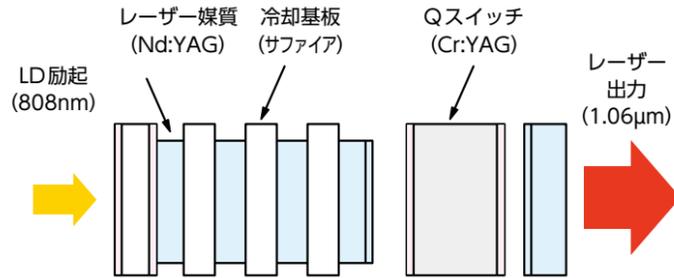
マイクロドメイン制御

わたしの研究室では90年代から主にNdやYbなど希土類イオ

ンを添加したYAG（イットリウム・アルミニウム・ガーネットの結晶）を用いて、レーザーセラミクスの開発を進めてきました。従来、セラミクスは気泡や不純物、さらに配向がランダムで散乱損失を下げるのが難しく、レーザーの材料としては不向きとされてきました。しかし、YAGであれば複屈折が無いの

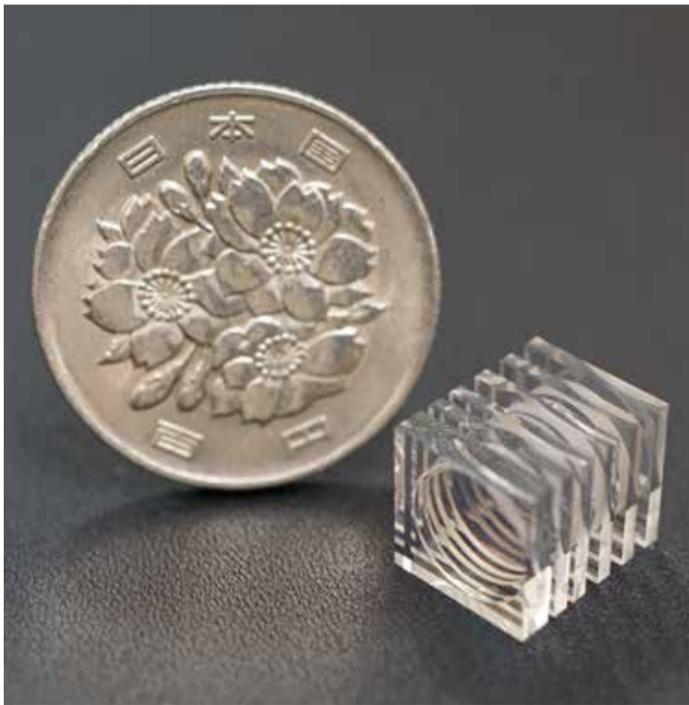
で配向を揃えなくとも透明になり、レーザー材料として有用である事を検証しました。ただ、それも限界がある事が分かり、われわれは試行錯誤を繰り返します。そして、物質を光の波長と同じマイクロメートル単位できめ細やかに制御すれば、その物質が持つ特性を効率的に引き出せることがわかりました。これ

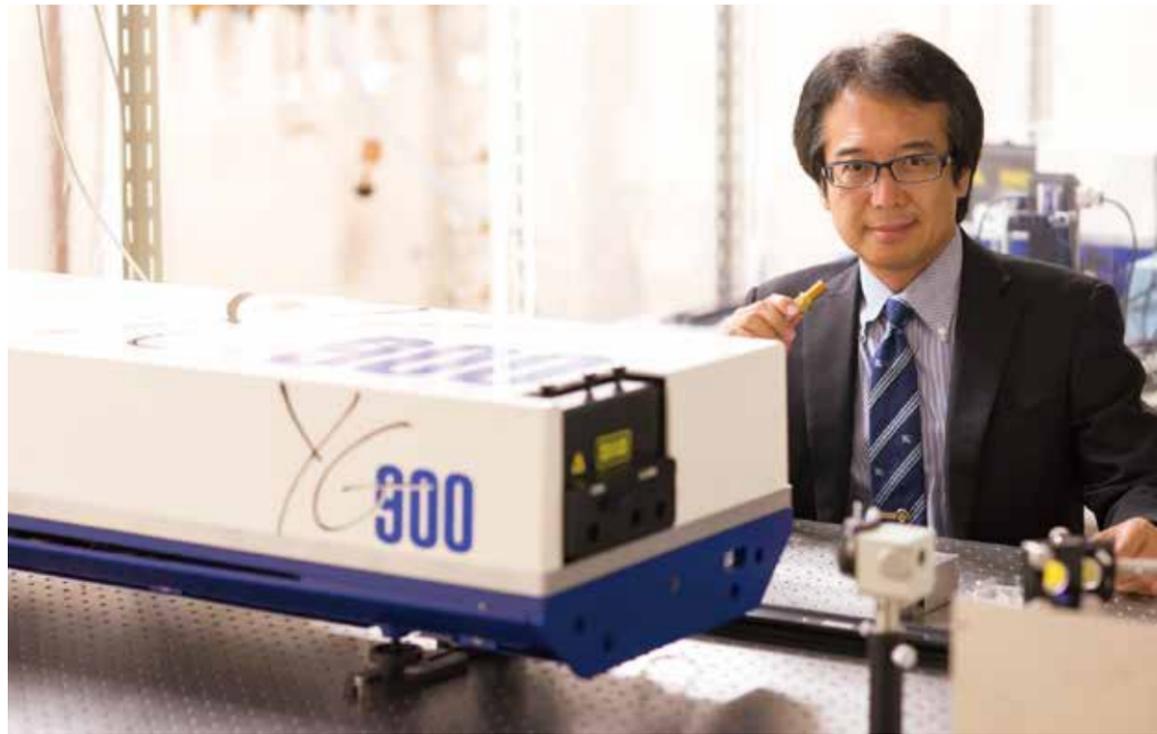
がマイクロドメイン制御です。マイクロドメイン制御によって配向をそろえることで、レーザーの特性を大幅に高めることができるのです。さらに、われわれは焼結法の工夫による配向制御によって、実現不可能と言われてきた異方性材料「REFAPセラミクス」のレーザー発振に世界で初めて成功しま



DFC構造

2017年に開発した多層構造のレーザー媒質。レーザー発振用のYAGと冷却用のサファイア基板を、接着剤を使わない常温接合によって交互に接合した。





2013年、点火用に開発したマイクロチップレーザーを持った平等教授。手前は従来の大型レーザー。

光学があります。非線形光学は、レーザーの出現によって生まれました。普通の光が物質に入射すると、吸収・発光など、さまざまな光学現象が光の電磁場と比例するような形で現れます（線形）。ところが、レーザー光のような強力な光の場合には、物質の応答が比例関係から外れ、多彩な現象を起す（非線形）ということがわかってきました。たとえば、入射光とは波長がまったく離れた領域にコヒーレント光を生じさせることができます。なかでもQPM (Quasi Phase Matching: 擬位相整合) 等の非線形光学素子を用いると、難しいとされてきたレーザー光の波長変換が効率にできるようなったことは画期的でした。これによって一台のレーザーでも波長を変えることで、さまざまな用途に使えるようになります。ただ、当初は壊れやすく微弱なレーザーしか使えませんでした。そこで、特殊なプロセスを

開発し、パワーレーザーにも使えるようにしました。 **次のイノベーション** **ジャイアントマイクロフォトニクス** 小型化・集積化によって、レーザーはどこでも利用できるようになりました。また、小型化されたレーザーを多数組み合わせで高性能化することで、従来は望めなかった極限的なハイパワーや波長・位相を、自在に制御できるようになります。最終的には物質の極限的な操作が可能になるとともに、インテリジェンスを持ったエネルギーを使えるようになるのではないだろうか。そう考えています。 わたしは、これを「マイクロ固体フォトニクス」を超えた「ジャイアントマイクロフォトニクス」時代の到来と呼んでいます。

した。

レーザー点火

2013年に、YAGセラミックスを使ったジャイアントパルスレーザーをプラグサイズにまで小さくし、自動車のエンジン点火に成功しました。世界初の試みであり、実はその前の2011年にはアメリカのニューヨークタイムズやイギリスのBBCでわれわれのレーザーが採りあげられ報道されました。ただ、車ですと価格などの問題もありますので、まずは火力発電所、船舶、航空機、宇宙ロケットエンジンなどへの展開が期待されています。

小型集積レーザー

大きな可能性を秘めたレーザーセラミックスですが、小型集積化を進めるにあたって、配向制御以外にも解決しなくてはならない課題がありました。それは、異方性材料の接合です。まず解決したかったのは、高出力にすると摂氏400度を超えてしまい、ビーム品質の低下や機械的破壊が起こる

ということでした。どうしたら熱を逃すことができるか。

そこで、私たちは新たな媒質を考案しました。表面活性による常温接合(SAB)によって作る多層構造(DFC構造)のマイクロチップです。

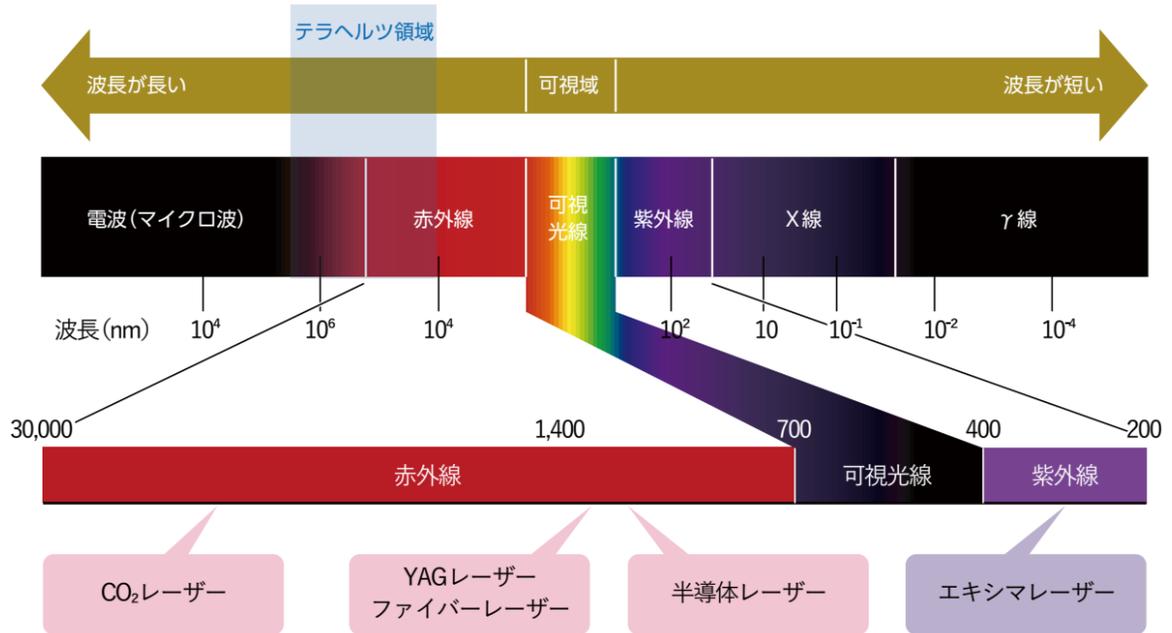
レーザー発振用のYAG結晶と冷却用のサファイア基板をどちらも薄くスライスして、交互に接合することを着想しました。このとき接着剤を使うわけにはいきませんので、表面活性接合(SAB)という原子レベルで物質を常温接合する新たな技術も開発しました。これによって深刻だった熱問題が解決されたのです。

レーザーセラミックスの限界を超える画期的なDFC構造の開発によって、数十メガワットのパワーレーザーが手のひらサイズの小型集積レーザーとなりました。わたしたちはこれを、TILA (Tiny Integrated Laser) と名付けました。

非線形光学波長変換

新たな研究分野としては非線形

電磁波の種類



PART3 小型集積レーザー(TILA)コンソーシアム

TILAを社会へ

TILAコンソーシアム

2019年4月、分子科学研究所・社会連携研究部門に「小型集積レーザー(TILA)コンソーシアム」が発足しました。企業や研究機関にメンバーに加わっていただき、研究開発と実用化に取り組んでいく組織です。

これまで研究者だけが浴びてきた先端技術の恩恵を、マイクロ化・高性能化・低価格化によって「いつでも、どこでも、誰にでも」使えるようにすることが使命です。

分子研が企業や研究者にとつて、気軽に連携できる施設になってほしいとも思っています。選択の幅を広げるため、さまざまなプロジェクトに携わっています。プログラム・マネージャーは、工学博士の佐野雄二先生です。先生は2014年から内閣府IMPACTプロジェクトでX

線自由電子レーザー(XFEL)とパルスレーザーの超小型化・ユビキタス化を目指してきた方で、現在、マイクロチップレーザー技術、結晶方位制御技術、接合技術、冷却技術などを基盤とした小型集積レーザー製品化のために奔走いただいています。

社会連携研究部門が目指すもの

理想とするのは、シリコンバレーとスタンフォード大学との関係、それと同じような関係を構築することです。

1993年から1994年と、文部省在外研究員としてスタンフォード大学で研究をしていた時、重力波とレーザー加速研究の草分けのひとりであるバイヤー先生と出会いました。

バイヤー先生は、「新しい先端技術が生まれれば、社会を変える新たな粒になる。最先端を研究するからこそ社会に影響を起

こせる」という信念で、大学の研究を企業に技術移転する、つまり先端技術を用いたビジネスを展開するベンチャー企業の育成をしていました。

アメリカではベンチャービジネスを立ち上げることに對して、ハードルが低く、寛容な土壌があると感じます。再挑戦するために力を蓄える場として大学や公共の研究所が機能しているのです。

将来、社会連携研究部門もそういった機能を担うことができれば素晴らしいと思います。

マイクロチップレーザーをはじめ、分子研には本当に優れた独自の技術が数多くあります。たとえば、小型化によってコストダウンにつながるような材料を産業界と連携して開発していけば、新しい産業の創出も期待できるでしょう。

いま、研究施設を改修していますので、来年の今頃は実験室も新しくなり、更に良い研究ができるようになっていくでしょう。また、企業や他の研究機関との連携の場としても活用する予定です。

小型集積レーザーの応用イメージ



小型集積レーザー(TILA)コンソーシアムとは

平等研究グループの研究成果を社会実装すべく、産学官を交えて支援・情報交換を行う超小型レーザー技術のイノベーション拠点。2019年4月1日に発足。企業などからなる一般会員と、幹事会員である分子科学研究所から構成されている。コンソーシアムの会員は、平等グループの研究を支援することで平等グループが所有する最先端技術・設備の利用や知的財産権に関わる優遇措置などを受けられる。一般会員数26(2020年10月現在)



世界で最も
小さなものを見る
巨大X線レーザー
「SACLA」

■ 全長700Mの顕微鏡

2011年、兵庫県佐用町の理学研究所に、世界で2台目のX線自由電子レーザーとして誕生した「SACLA」。全長700メートルの施設は、強力なX線をつくる、一台の巨大なレーザー装置だ。

約400メートルの加速管で電子を光速まで加速し、約240メートルのアンジュレータで、光速で進む電子から世界最短波長0.063ナノメートルのX線を発生させる。

極小の原子ですらSACLAのX線よりも波長が長い。よって、その構造まで「コマ送り」で観察できる。ウイルスのDNA解析など、微細なものを視る精度は、世界最高レベルといわれている。

隣接する大型放射光施設「SPring-8」は高性能放射光によって物質の解析を行う施設。

タイヤの燃費効率の解析から魔鏡の裏に隠された文字の透視まで、微細な構造分析を必要とする現場で幅広く活用されている。

■ SACLAの小型化

小型集積レーザーを使ってSACLAをトレーラーサイズまで小型化しようというプロジェクトがある。

SACLAがコンパクトになれば、産業界、インフラのメンテナンス、

医療関係やセキュリティなどを与えるインパクトは計り知れない。研究所サイズまで縮小できれば、最先端科学の世界をあらゆる場所・場面で手軽に利用できるようになる。

また、既存のシステムがコンパクトになれば、より高性能な大型システムが登場し、次なる新しい物質の発見も期待できるだろう。宇宙はどう始まって、どう壊れ、消えていくのか。そういった謎の解明にも近づくはずだ。



電子を光速まで加速させる400メートルの加速管

広がるレーザーの可能性

市場規模は1.2兆円。製造からインフラ、医療までいまやレーザーは想像以上にわたしたちの身近にある。レーザー技術は社会の中でどのように利用されているのか。小型化によってどんな革新がもたらされるのか。レーザーの可能性を探る。

レーザーを搭載した火星探査ロボットのイメージ

レーザーの応用分野

土木・建築

直進性を活かした計測

レーザー光は、真っ直ぐに進むため、高い精度で距離を割り出すことができる。先駆けとなったのはアポロ11号が行った測距実験だ。月面に設置したレーザー反射器にレーザー光を当て、反射した光が戻ってくるまでの時間を測定し、地球と月の距離を正確に割り出した。

今日では高層ビルの建設や鉄道の敷設、トンネル工事などにも広く利用されている。航空機によるレーザー測量では、隠れた地表面も正確にデータ化できる。

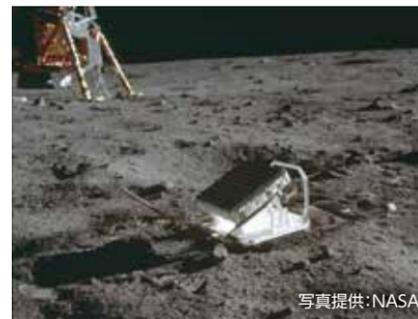
建造物のメンテナンス

従来トンネルなどのメンテナンスは、作業員が叩いて音を聞きながら状態を確認していくという地道で危険な作業を要したが、レーザーを使って離れた所から叩くこ

とができるようになった。ドローンにマイクロチップレーザーを搭載すれば、橋などの危険な場所も遠隔で測定分析することが可能だ。

リアルタイムで遠隔分析

過酷環境下におけるレーザーを使った遠隔分析技術開発が進んでいる。用いられるのは、レーザー誘起ブレイクダウン分光(LIBS)分析法だ。遠隔、オンライン、かつリアルタイムで計測可能であるため、火星探査、海



アポロ11号が行ったレーザー測距実験

洋探査、廃棄物リサイクルなどの分野での適応が期待されている。

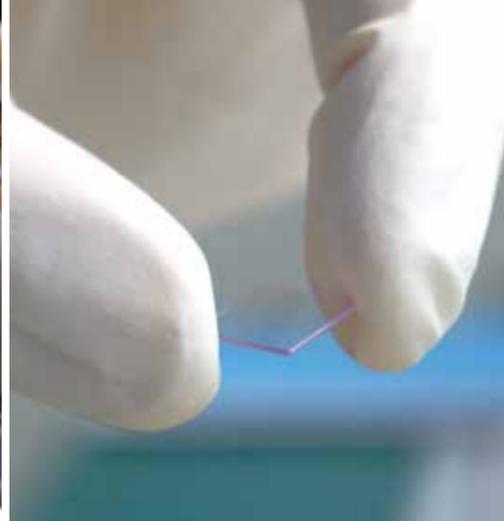
福島第一原発の廃炉作業

福島第一原子力発電所では世界でも例のない事故炉の廃炉作業が今も行われている。安全かつ迅速な作業のため、レーザーによる遠隔分析が期待されている。マイクロチップレーザーは強力な放射線環境下でも適用可能であることから、ファイバーの先端に小さなマイクロチップレーザーを装着するという新しい発想が生まれた。この提案は福島廃炉プロジェクトの最高ランクS評価を獲得している。

製造業

材料加工・溶接・切削

製造業において、レーザーカッターや微細な穴開けから溶接などのレーザー加工機は様々な材料の加工や切断に利用され、生産性の



向上に貢献してきた。しかし、設備が大型で価格が高額なことが普及の足かせとなってきた。

今後、レーザーの小型化・低価格化が進めば、熟練のエンジニアの仕事だった溶接は、小型レーザー搭載の溶接ロボットが肩代わりできる。施工時に溶接の欠陥を非破壊で検出することもできる。さらに、飛行機の製造など大型プレスや金型が必要な現場も、持ち運べるパワーレーザーの導入でインベーションが起こるはずだ。

レーザー光で金属の表面をたいて曲げたり薄くしたり複雑な成形ができ、熱処理の必要がないため、疲労強度も向上する。

テラヘルツ波で透視

ような「透過性」と光波のような「直進性」を持つことから、封筒内の薬物検出など非破壊での透視解析が必要なシーンで応用が期待されている。

医療分野

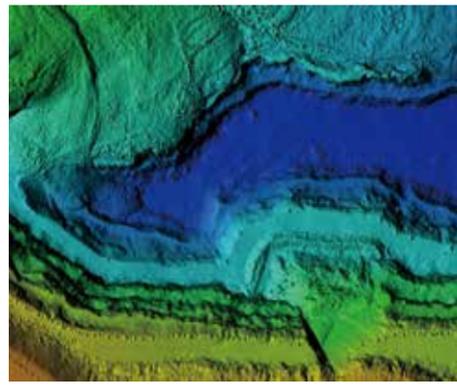
治療から手術まで

疾患に合わせて波長を選択することで、様々な症状の治療に適應できる。近視の矯正手術（レーシック）や白内障の手術など、眼科におけるレーザー手術は、比較的なじみ深いところだ。メスを使うよりも出血が少なく、身体への負担が少ないため、静脈瘤などの血管疾患やヘルニア、外科的手術に利用されている。スキンセラピーなど美容方面からも注目されている。

近未来の医療

アパタイトというセラミックスが、生体材料として研究されている。アパタイトは骨や歯とよく似た材料で生体親和性が高いことから、体に直接装着し、通常の生活が送れるようになれば、脳科学研究や先端医療への貢献は少くない。ウェアラブルなマイクロチップレーザーの開発が進めば、事故で感覚や運動機能を失った場合、脳とコンピュータのインター

小型集積レーザーで、未来を切り拓く。



フェイスとなりうるため、非侵襲に、より本来の機能体に近い再生が可能だ。リハビリや脳疾病の治療、喪失感覚・運動機能の再建にも活用できるだろう。