

パワーレーザーで新物質材料創成

Creating new materials with high-power lasers

尾崎典雅 准教授(工学研究科兼任)

共同者: 児玉了祐 教授(工学研究科兼任)、 中村浩隆 助教(工学研究科)

レーザー超高圧縮で新物質状態を創る・観る技術

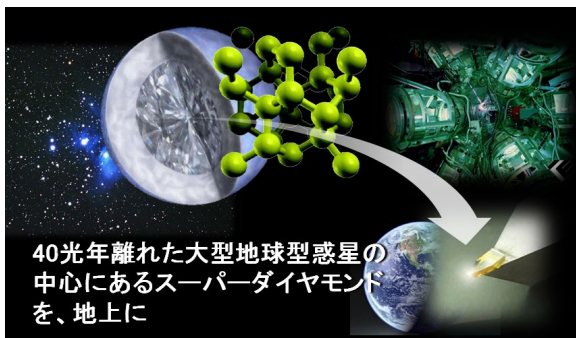
高出力のパルスレーザーを固体表面に集光照射すると高温・高密度プラズマが生成されアブレーションが起こり、超高圧の圧力波や衝撃波が生成され固体内部に伝播する。このような動的な圧縮により比較的容易に100万～1000万気圧を超える超高圧状態を創り出すことができる。この超高圧状態は、惑星の中心の圧力に相当するとともに、地上に存在していなかった新たな物質材料を創り出すことができる。

レーザー超高圧で新物質材料を創るカギとなる技術の1つは、超高圧状態のダイナミクス制御技術を実現するレーザーパルス波形整形技術であり、もう1つはXFELなどによるレーザー超高圧状態のマイクロダイナミクス診断技術である。これらによりレーザー超高圧下での構造変化の診断と制御による新物質創成の可能性や全く新しいレーザープロセスが期待されている。さらに今後、より高精度かつ大量のデータを可能とする高繰り返しパワーレーザー技術の進展も期待でき、情報科学との連携などによる新学術の創成と共に新たなイノベーション創出が期待できる。



応用1 新しいダイヤモンドを創る

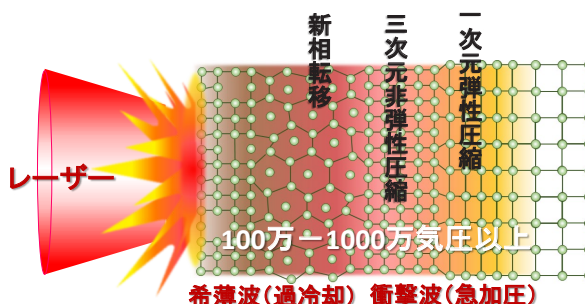
パワーレーザーを利用し、炭素(グラファイト)を圧縮することで様々なダイヤモンドを創ることができる。レーザーによる1次元圧縮により、比較的容易にグラファイトから六方晶ダイヤモンド(ロズデーライト)を創ることが可能になってきている。これはダイヤモンドより1.58倍以上の硬度があると考えられている。さらに1000万気圧以上で体心立方(BC8)ダイヤモンド(スーパーダイヤモンド)の状態を実現し、手の上に取り出すことを試みている。これは系外大型惑星(スーパーアース)のコア物質と思われる。



応用2 新しい金属を創る

レーザーによる動的な圧縮は、通常の静的な圧縮と異なり、超高速でかつ1次元圧縮である。この特性を活かして様々な金属を創り出すことができる可能性がある。

- ・金属シリコン(10万気圧以上)
レーザーの高速圧縮・冷却による高压相凍結による金属シリコンの取り出しの可能性
- ・混合相状態のナノ構造鉄(10-100万気圧)
異なる高压相の混合鉄を創り出せる可能性
- ・金属カーボン(3000万気圧以上)
未発見の超軽金属カーボンの可能性

グループHP
キーワード<https://www.eie.eng.osaka-u.ac.jp/ef/>

超高圧、高密度物質、X線自由電子レーザー、超高速観察



レーザー材料工学グループ

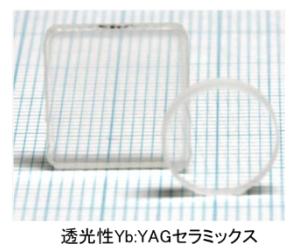
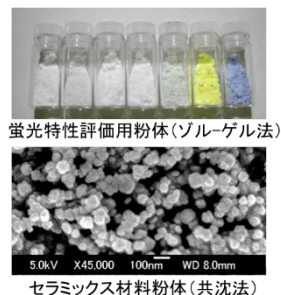
透明セラミック技術

Transparent Ceramics Technology

藤岡加奈 准教授

粉体合成からセラミックス透明化まで

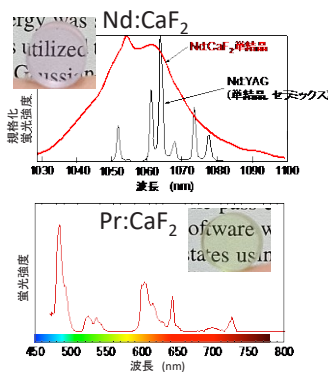
レーザーの高出力・高繰り返しを目指し、希土類元素を添加したYAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) セラミックレーザー材料の透明化と接合の技術開発を行ってきました。透光性セラミックスの製造は、母材に添加する活性元素の選定、濃度最適化の探索から共沈法、ゾルゲル法、水熱法などの材料粉体製作、成型、焼結、ポスト焼結を一環して行う設備を有しています。この製作工程には多くのノウハウが凝集されており、レーザー材料のみならず、バルク及び粉体の白色光源、磁性光学材料、シンチレーターなどの幅広い分野で応用することが可能です。



応用1

新レーザー材料
アルカリ土類金属フッ化物

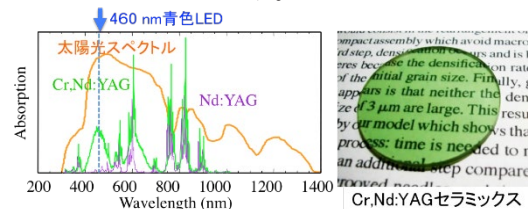
最先端科学と医療・産業分野の幅広い開拓を可能にする高パルスエネルギー・高繰り返しなレーザーを実現するための「短パルス化が可能で排熱に優れたアルカリ土類金属フッ化物透光性セラミックレーザー材料」の研究を行っています。



応用2

酸化物レーザー材料
発光元素共添加技術

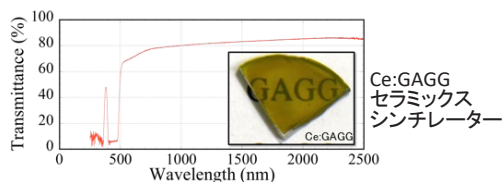
太陽光励起レーザー材料として、太陽光に多く含まれる可視領域の光を有効活用するようにNd:YAGにCrを共添加しました。最近、安価になった青色LD励起による緑～赤の波長域の発光材料が注目されつつあります。



応用3

高融点・分解熔融型材料

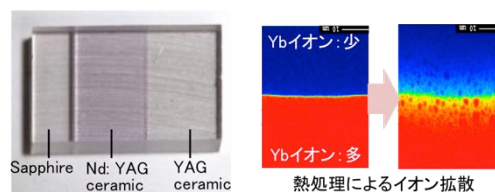
焼結温度が低いセラミックス技術は、高融点材料、あるいは分解熔融型化合物(加熱時に元の組成と異なる固相と液相に分解)の製作に力を発揮します。次世代シンチレーター材料であるCe:GAGG($\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$)やCe:SrHfO₃、磁性光学材料Ce:Tb₃Al₅O₁₂などがその例です。



応用4

セラミックス接合

高速アルゴン原子ビームを用いて表面を活性化し、セラミックス同士、あるいは異種材料(単結晶、金属など)と常温で接合します。レーザー材料の冷却促進以外に、接合後の加熱によってイオン濃度の傾斜制御も可能です。

グループHP <https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/lmo/>

キーワード 透明セラミックス、元素共添加、接合



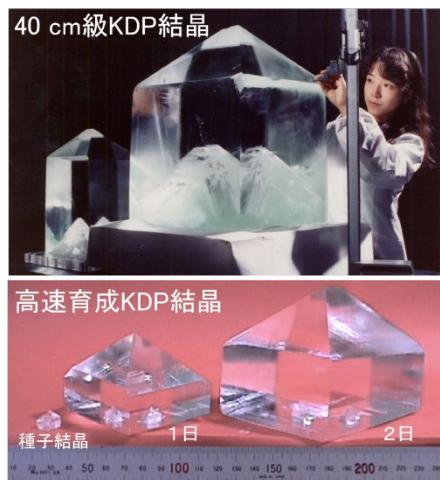
溶液成長結晶の育成技術

Technology for Growing Solution-grown Crystals

藤岡加奈 准教授

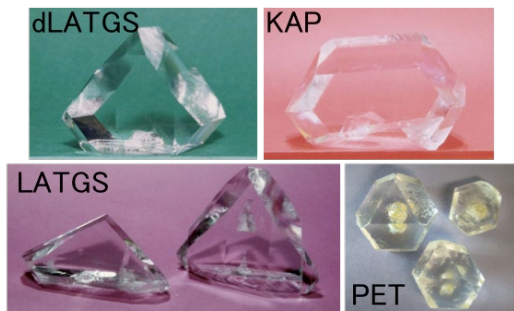
母液中のクラスター分子分解による高速成長

大型ガラスレーザー装置激光XII号の波長変換素子として非線形光学結晶KDP (KH_2PO_4)の大型結晶育成技術を開発し、当時、世界最大の40cm級結晶の育成に成功しました。大型で高品質の結晶を育成するため、育成母液の攪拌方法や、母液に紫外線を照射することにより結晶の耐レーザー損傷性を向上させるノウハウも蓄積しています。また、母液中の溶質クラスター(溶質分子の集合体)を熱や音波エネルギーで破壊することで育成母液の高過飽和度を達成する技術も開発し、従来の育成方法に比べ10倍以上の速度(最高53 mm/日)での育成に成功しました。これらの技術は溶液成長の結晶育成に広く応用できる可能性があり、光学分野のみならず食品分野でも適用が試みられています。



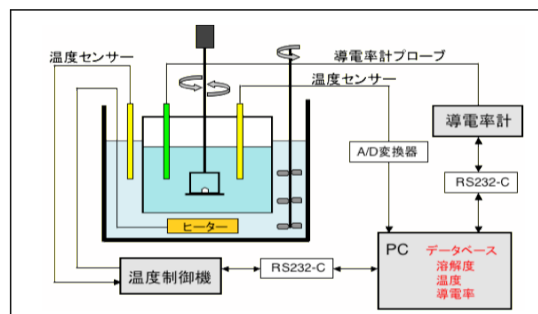
応用1 各種水溶性結晶の高速育成

高速育成技術を用いて、広帯域焦電型赤外線センサーなどに使われるLATGS (L-アラニン添加硫酸グリシン)やdLATGS (重水素化LATGS)、X線分光結晶であるKAP (フタル酸カリウム)やPET (ペンタエリスリトール)を従来より数十倍の速度で育成可能にしました。生産性のみならず、種子結晶の選択によって歩留まりの向上にも寄与することができることを提案しました。これらの技術、知見は広く溶液成長結晶の育成に適用が可能です。



応用2 結晶育成の自動化

高品質の結晶を安定して育成するには、結晶の成長速度を一定に保つことが重要です。そのためには、育成中の母液の過飽和度を精密に調整する必要があります。過飽和度は母液の温度、伝導率、溶解度に依存するため、これらの関係のデータベースを構築し、伝導率の測定値を基に過飽和度が一定になるように温度制御します。この育成制御の全てをコンピューターにより自動で行ないます。最新のAI技術を応用すれば、さらなる省力化とコストダウンも期待できます。



グループHP <https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/lmo/>
 キーワード 溶液成長、高速成長、自動化



コンポジットセラミック蛍光体

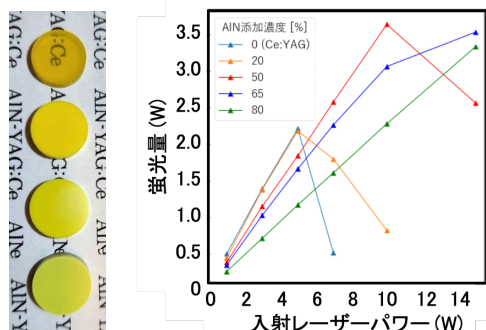
Composite Ceramic Phosphor

藤岡加奈 准教授

温度消光を抑制するための 非酸化物/酸化物コンポジットセラミックス 白色光源用蛍光体

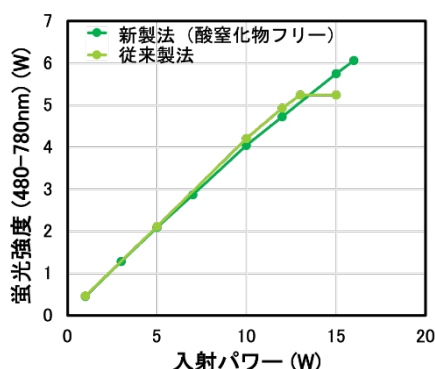
遠方でも必要なところだけを照らすことのできる青色半導体レーザーと蛍光体を用いた照明の開発を行っています。よく光り、温度変化に影響されない長寿命の蛍光体、クールからウォームまで様々な白色を実現する蛍光体の研究を行っています。

酸化物であるCe:YAGと非酸化物で高熱伝導のAlNをコンポジット化する技術を開発し、高パワー励起による蛍光体の温度消光を抑制が可能になりました。



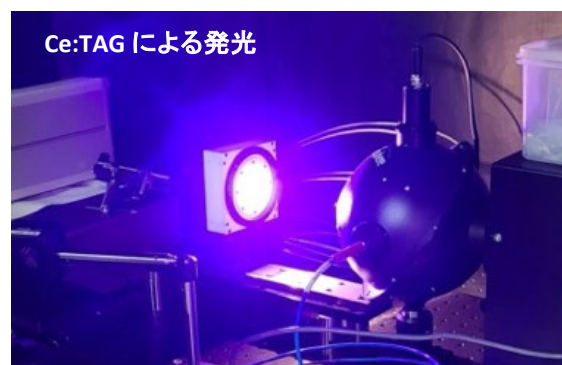
応用1 高熱伝導 セラミックス蛍光体

酸化物と非酸化物のコンポジットセラミックスでは、酸窒化物の副生成物が出現し易く、高熱伝導化の効果低減の原因となります。それを回避するため、Ce:YAG蛍光体に工夫を加えたコンポジットセラミックス新製法によって、さらなる性能向上が確認されています。



応用2 暖色白色光源用 セラミックス蛍光体

レーザー照明をさまざまなシーンに適用するため、色温度の異なる発光を示す蛍光体の研究を行っています。特に、暖色系白色用の蛍光体は温度消光が顕著で高熱伝導材料とのコンポジット化が有効です。



ナノ材料を用いたTHz機能創成

Terahertz functionalities in nano-materials

斗内政吉 教授

共同者: 河野淳一郎 教授(米国ライス大学)

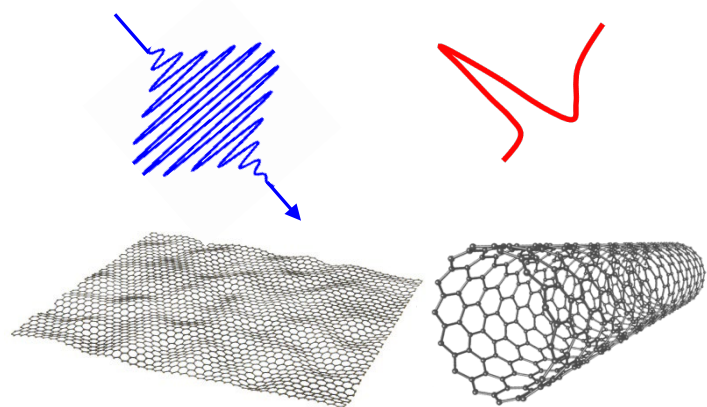
低次元ナノ材料の物理と応用

フラーレン、カーボンナノチューブ、グラフェンといった、炭素系のナノ材料の発見により、理想的な低次元電子系材料を用いた研究開発が可能となった。これらの低次元ナノ材料は、基礎物理的に興味深いだけでなく、低損失・高速動作可能な次世代電子デバイス、超高感度センサー、高効率エネルギー変換デバイスなど、様々な応用にも期待が持たれている。

我々は、このような低次元ナノ材料の電子・光物性を明らかにするとともに、光・テラヘルツ機能を開拓し、次世代デバイス応用に向けた基盤的研究を推進している。

超短パルス光

テラヘルツパルス



グラフェン

カーボンナノチューブ

応用1

グラフェンやカーボンナノチューブを用いたテラヘルツ波発生

低次元ナノ材料は、通常の固体と異なる特異な電子構造を持ち、また表面積が非常に大きいため外部環境に非常に敏感であるといった特徴がある。そのため、次世代の高速光デバイスや高効率太陽電池、超高感度センサーなどの応用が期待されている。

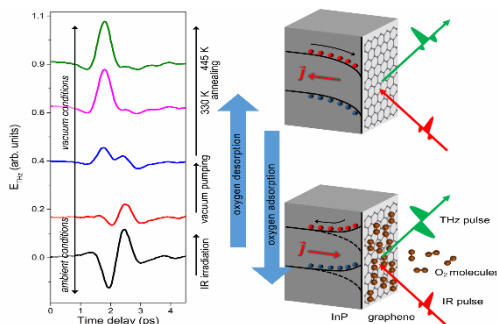


図 グラフェンへの分子吸着によるグラフェン/InP接合から放射されるテラヘルツパルス波形の変化

Nano Lett. **20**, 3098(2020), Nano Lett. (2023) in press.

応用2

新規テラヘルツ分光手法の開発

低次元ナノ材料のテラヘルツ分光計測を精度良く行うためには、高感度な計測手法の開発が必須である。我々は、平行平板導波路を利用して超薄膜の面方向にテラヘルツ波を伝搬させることにより相互作用長を飛躍的に増大させ、グラフェンなどの超薄膜の計測に有用な分光手法を開発した。

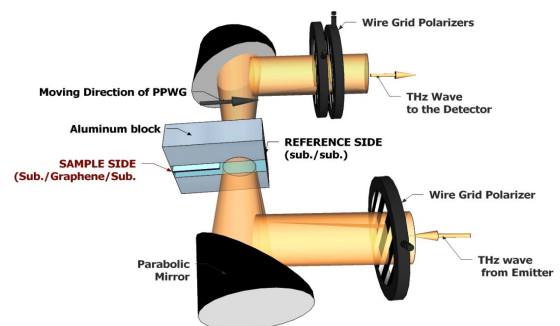


図 平行平板導波路型テラヘルツ分光システムの模式図

APEX **9**, 032002 (2016), Optics Express **24**, 3885 (2016)
Optics Letters **42**, 3056 (2017)

グループHP

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/thp/>

キーワード

Terahertz waves, graphene, nano-tubes



超広帯域フォトニクスグループ

Beyond 5G/6G 材料のデザインや評価

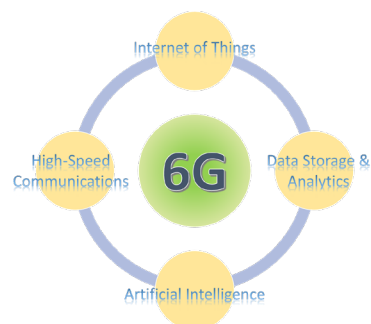
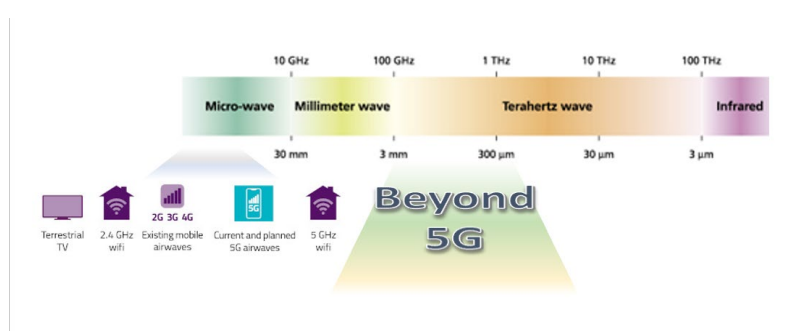
Design and Evaluation of new materials for Beyond 5G/6G

中嶋 誠 准教授

共同者: V. Agulto特任助教、加藤康作特任研究員

Beyond 5G (6G)

‘Beyond 5G’ もしくは ‘6G’ と呼ばれる次世代の通信帯域は、100 GHz ~ 1 THzの周波数に相当し、テラヘルツ帯に位置します。これらの電磁波は、携帯電話等に用いられるだけでなく、IoT (Internet of Things)やDX (Digital Transformation)の主要な要素となります。高周波の電磁波は、広い帯域を持ち、高速な通信環境を提供し、ビッグデータ記録にも寄与します。6G 帯で利用される材料開発は現在もっとも注目を集めています。メタマテリアルをはじめとする新規材料の開発をはじめ、6G帯での光学応答や伝導特性の評価から、新材料開発の支援を実施します。



応用1 Beyond 5G帯における特性評価

Beyond 5G領域(100 GHz-1 THz)のみならず、5Gの領域(50 -100 GHzなど)における物性特性評価が可能です。透過測定のみならず、反射測定も実施可能であり、状況に合わせて配置での測定が行えます。

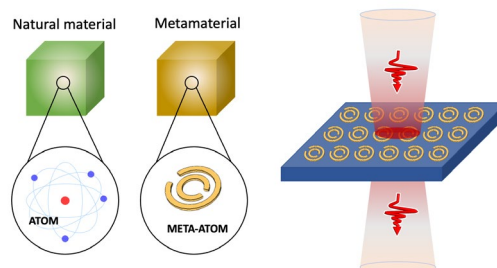
吸収材や磁気材料だけでなく、基板材料や新材料のBeyond 5G帯での評価を実施します。下記の特性を得ることにより、デバイス設計の指針となるパラメータの取得が可能です。

多様な特性の評価が可能

透過率
反射率
屈折率
誘電率・誘電正接
電気伝導度

応用2 Beyond 5G応用に向けた新材料

Beyond5Gデバイスに応用可能な新材料の開発を行っています。メタマテリアルは、波長よりも小さい構造物からなる新規の人工物質です。その機能や周波数特性は、その構造のサイズや形状からデザインすることが可能です。6G通信帯における新材料開発に応用することも可能です。我々は、理論計算よりその応答特性を予想することができ、また、実験的にそれらの特性を確認・評価することも可能です。

グループHP <https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/up/>

キーワード Beyond 5G, 6G, 次世代通信、テラヘルツ、メタマテリアル



新しい結晶成長技術

Advanced crystal growth technology

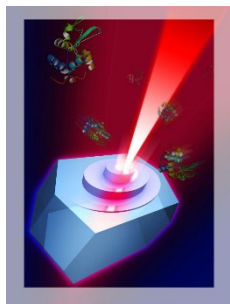
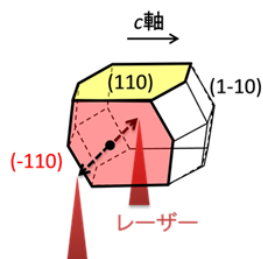
吉村政志 教授

共同者：森勇介教授(工学研究科)、吉川洋史教授(工学研究科)、丸山美帆子教授(工学研究科)

レーザーアブレーションを用いた結晶成長

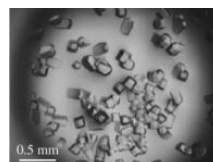
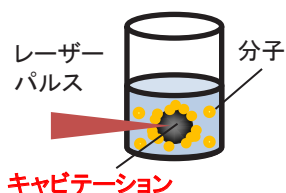
タンパク質の分子構造解析のためには、良質な大型単結晶が必要とされますが、適切な過飽和溶液環境下においても結晶の成長が停止するという課題がありました。結合が弱く、転位が少ないタンパク質結晶では2次元核成長モードが支配的となる点に着目し、レーザーアブレーションによって制御することを試みました。

リゾチーム結晶(タンパク質)



レーザー誘起核発生

溶液結晶成長法の1つとして、フェムト秒レーザーを過飽和溶液に照射し、キャビテーションバブルを介して核発生を誘起する技術開発を進めてきました。これまでは巨大分子であるタンパク質結晶の結晶化に取り組んでいましたが、最近では薬剤候補化合物の有機低分子の多形制御への応用研究に取り組んでいます。

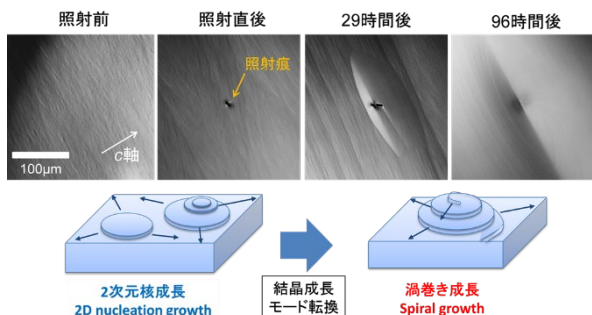


リゾチーム結晶(タンパク質)

応用1 結晶成長モードの能動制御

フェムト秒レーザーを用いて、溶液中で成長が緩やかになったリゾチーム結晶表面にレーザーアブレーション痕を形成すると、そこから渦巻き成長が誘起されて面全体がスパイラルステップで覆われました。これによって成長モードが理想的な渦巻き成長に切り替わり、成長が促進されて結晶が大型化するという新しい現象を発見しました。

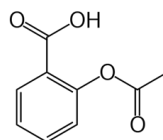
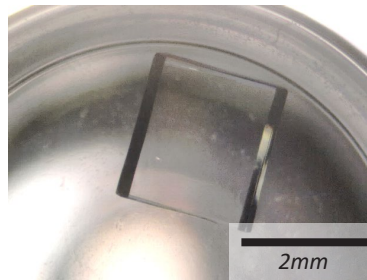
Nature Photonics, Vol.10, pp.723-726 (2016.10).



応用2 有機低分子の準安定形開発

種々の薬剤は、主成分の有機低分子を結晶化したものを顆粒・錠剤化しています。一般に再安定形の結晶構造が採用されていますが、開発段階では準安定形の結晶形探索が求められます。

解熱鎮痛薬として知られるアスピリンの低過飽和溶液にフェムト秒レーザーを照射すると、通常結晶が晶出しない条件において、写真に示すような準安定形の大型単結晶作製に世界で初めて成功しました。

解熱鎮痛薬
アスピリン

グループHP

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/up/>

キーワード

結晶成長モード制御、レーザー誘起核発生



マクロなビーム形状制御:ビーム整形

Macroscopic beam shape control: beam shaping

中田 芳樹 准教授

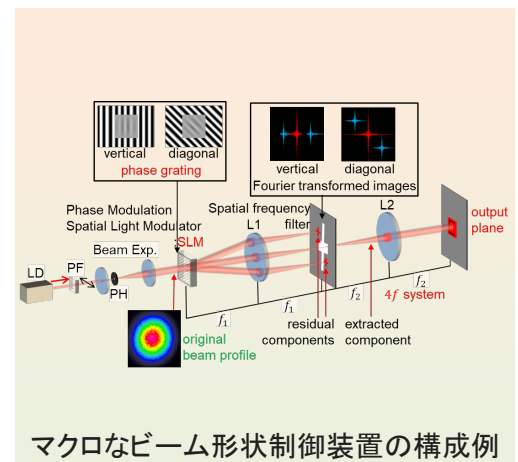
空間周波数フィルタリングの最適化による 超高精度ビーム整形

レーザー技術の応用は基礎科学から産業まで非常に多岐にわたる。そのポテンシャルを最大限発揮するためには、ビームが持つさまざまなパラメーターを最適化する必要があるが、その中で最も重要なパラメーターと言える「光の強度と位相の分布」を精密に制御する技術を開発した。

右図が装置構成例である。空間光変調器 (Spatial Light Modulator: SLM) に周期的な位相分布を持つ「位相グレーティング」を表示し、入射するレーザービームにエンコードする。回折光をフーリエ面で除去し、出力面におけるビーム形状を制御する。ここで位相グレーティングの位相を ϕ_1 、 ϕ_2 とすると、ここでの電界強度と位相は

$$E' \propto E_0 \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \times \exp\left(j\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)$$

で表されるため、空間的な位相差分布 $\Delta\phi(x, y)$ でビーム整形が可能となる。この時、位相グレーティングの k ベクトルを最適化することで、フーリエ面における除去光と抽出光の完全な空間分離が可能となり、従来法に比べて格段に精度の高いビーム整形が可能になる。

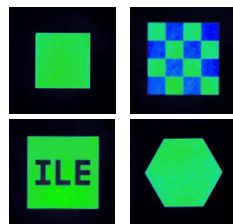
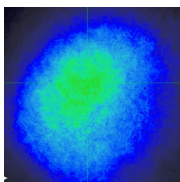


マクロなビーム形状制御装置の構成例

応用1 マクロなビーム形状の整形

従来のビーム整形には空間フィルタリングやCGH、DOE、マイクロレンズアレーなどがあり、フラットトップへのビーム整形が行われてきましたが、精度や波面の乱れ、形状の自由度などに難点があった。一方で本手法は、他の手法より格段に精密なビーム整形と波面制御が可能である (下図: Copyright (2019) Nature)。この技術は、様々なレーザーの応用において、そのポテンシャルを最大限発揮することを可能にしている。

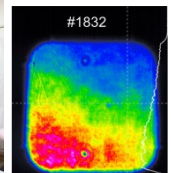
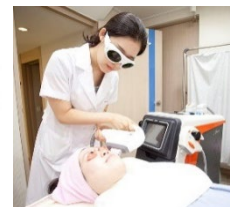
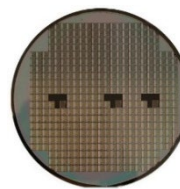
不均一・不均質な
ビーム



フラットトップやパターン形状
などへのビーム整形の例

応用2 均一・均質なビームの応用

この技術は、均一性や制御性が重視される全ての面積照射に応用できる。例えば、ステップスキャニングを併用した多ショット大面積加工、さらには皮膚病や美容医療などがある。一方、強度分布が内包されている大型レーザーのビームパターンでは、光学素子のダメージを防ぐために出力を上げることができない。そこで、増幅する前の前段部で最終的なビーム形状がフラットトップになるようビーム整形を行うことで、最大の出力を得ることができます。



グループHP

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/plp/>

キーワード

ビーム整形、空間周波数フィルタリング、空間光変調器、フーリエ光学系



マイクロなビーム形状制御：干渉パターン制御

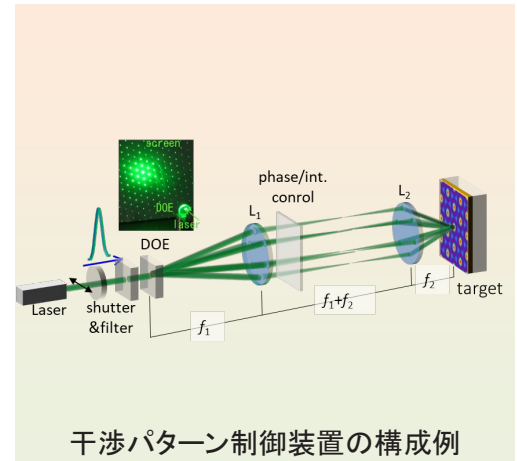
Microscopic beam shape shaping: control of interference pattern

中田 芳樹 准教授

干渉パターン制御

レーザーの本質的な特徴であるコヒーレンシーによって生み出される「干渉パターン」は、さまざまな応用がある。一般的には、同じ波長と位相を持った複数のビームを交差させることで、格子状や光子配列されたドット状の光パターンが得られる。

一方で、ビームごとのパラメーターを精密に制御することで、光パターンの形状制御範囲が広がる。同じ光形状が事実上無限に配列できるため、周期構造を一括して形成することができる。さらに周期の精度や自由度が非常に高いなど、さまざまな特徴を備えている。古くから回折格子の書き込みに利用されており、近年ではハイパワーレーザーの干渉パターンを用いた直接加工や周期構造の形成が可能となっている。その結果、この技術の応用範囲は格段に広がっている。



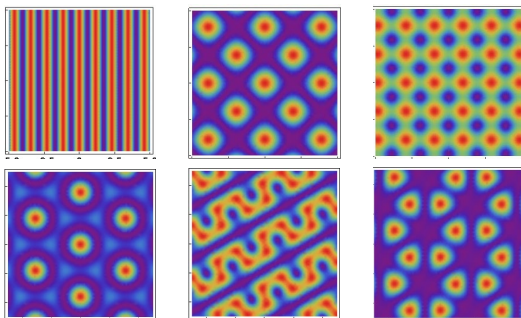
干渉パターン制御装置の構成例

応用1 干渉パターンの制御

レーザービームの電界強度は次式で表される。

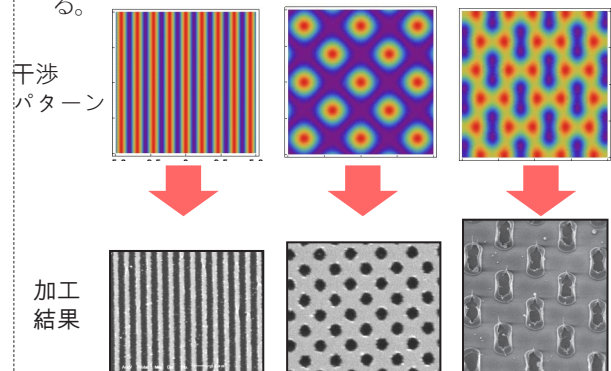
$$E_n(x, y, z, k_n, \theta_n, \phi_n, \omega_n, \alpha_n, t) = E_{n0} \cos(k_n \cos \theta_n \times z + k_n \sin \theta_n \times (-x \cos \phi_n - y \sin \phi_n) - \omega_n t + \alpha_n)$$

複数本のビームを重ね合わせた干渉パターンは、それら電界を加算して2乗し時間平均することで表される。ビーム本数及び E_{n0} と α_n を制御する事で、下記の例にあるようにバラエティに富んだ干渉パターンを形成する事が可能である (Copyright (2012) OPTICA, (2010) Springer, (2002) AIP)。



応用2 干渉パターンを用いた加工

左の干渉パターンを用いて物質加工を行うことで、周期構造を直接形成する事が出来る。干渉パターンはオンデマンドで制御が可能であり、レーザー加工が可能な物質であれば全て適応可能で、エッチングが必要な露光プロセスと比較して簡便かつ応用範囲が広い。下記は全て金薄膜を加工した例であり、グレーティング構造や周期穴構造 (MHA)、周期配列した島状構造が形成されている。



グループHP

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/plp/>

キーワード

干渉パターン、加工、プロセッシング、メタマテリアル



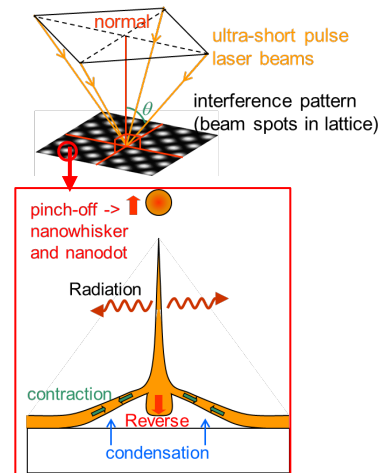
超短パルスレーザーを用いた3次元ナノ構造形成

Formation of 3D nanostructures using ultrashort pulsed lasers

中田 芳樹 准教授

超短パルスレーザーの干渉パターン加工応用と 3次元ナノ構造形成

フェムト秒レーザーに代表される超短パルスレーザーを用いた物質加工は、一般的に熱による悪影響（クラックやデブリなど）が無い加工法と見なされている。一方で、干渉パターンのようにスポットサイズが波長オーダーになる加工では、微細なスポット領域における熱的プロセスが主体となり、3次元ナノ構造が形成される場合がある。干渉パターンのスポット毎にフェムトリットルの金属が流体的な挙動を起こし、冷却によって固化するタイミングでナノ形状が固定する。このプロセスで、パラメーターを精密に制御することによって、さまざまなナノ構造の作製が可能である。さらに、飛散する金属ナノ流体を堆積させることで、周期的なナノドット構造の形成が可能である。微細加工の応用では、新たな材料特性を持つナノデバイスの開発や、次世代の光学デバイスの製造などが考えられる。また、バイオテクノロジー分野においても、この技術を用いた細胞操作やバイオセンサーの開発が進められている。



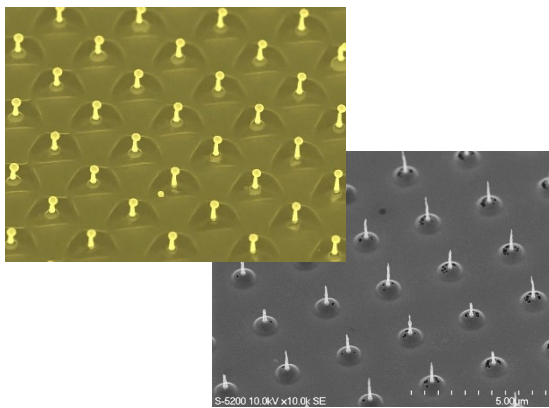
超短パルスレーザーによる3次元ナノ構造形成の模式図

(Copyright (2013) Elsevier)

応用1

周期配列金ナノドロップ構造及び 金ナノウィスカー構造の形成

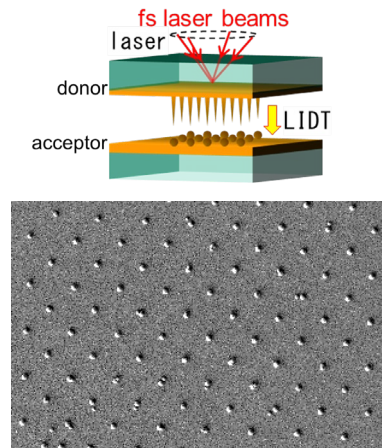
超短パルスレーザーの4ビーム干渉パターンを金薄膜に適切なパラメーターで照射することで、周期配列した金ナノドロップ構造（上）または金ナノウィスカー構造（下）を形成することが出来る。後者の頂点曲率半径は4nmであり、トップダウン的な加工法で形成された構造としては世界最小である（Copyright (2010) Springer, (2013) Elsevier）。



応用2

干渉パターンを用いた 周期配列ナノドット作製

左の金ナノウィスカー構造はナノドロップが離脱することで形成される（上図）。これを堆積する手法がレーザー誘起ドット転写法（LIDT）であり、周期配列した直径500nm以下のナノドット構造をシングルショットで作製する事が可能である。（Copyright (2020) IOP Publisher）。



グループHP

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/plp/>

キーワード

干渉パターン、ナノドロップ、ナノウィスカー、ナノドット、周期配列



レーザー加工技術の宇宙応用

Laser Applications for Space

藤田雅之 招へい教授(レーザー技術総合研究所)

共同者: 兒玉了祐教授

レーザーを用いた月面基地建設材料の製造

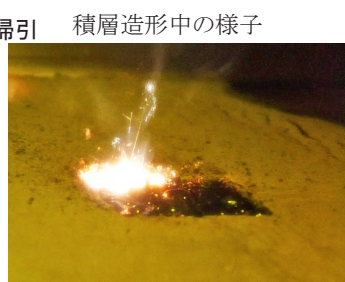
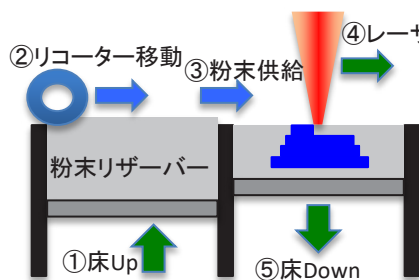
月面探査や火星移住など惑星での人類活動に際して、輸送機の離発着場や運搬路等を含む基地建設が必要となる。地球からの物資の運搬は高いコストや輸送能力の限界があるため、大量の建設材料を現地で入手して製造することが求められる。その解決策として、惑星の表土をレーザーで焼成・熔融させて積層する方法に着目した研究を進めている。レーザーを用いた手法では現在実用化されている3Dプリンターの技術が適用可能であり、将来的には宇宙での利用が期待される太陽光励起レーザーの活用が考えられる。



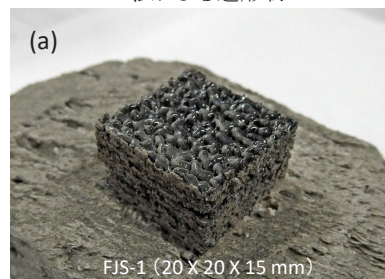
応用1 レーザー積層造形による建材作製

2種類(PBF法とDED法)の市販3Dプリンターに“月の模擬砂(FJS-1)”を装填しレーザー積層造形の実験を行い、建設材料や各種部材としての性能を評価している。PBF法の場合、サブミリのガラスビーズが凝集して層を形成するため、形状精度は高いが圧縮強度は数N/mm²程度となった。一方で、DED法の場合は砂(主成分はシリカ)が連続供給され熔融しガラス化することで層を形成するため、圧縮強度としてコンクリート並みの100 N/mm²以上が得られた。

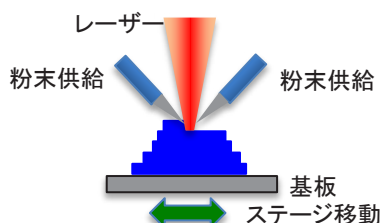
粉末床熔融結合法(PBF法: Powder Bed Fusion)



PBF法による造形物



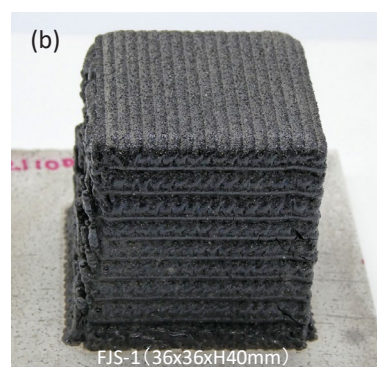
指向性エネルギー堆積法(DED法: Directed Energy Deposition)



レーザー照射、粉末供給、ステージ移動を同時に行う。



DED法による造形物



グループHP <https://www.ilt.or.jp/>

キーワード 月の模擬砂、レゴリス、3Dプリンター、月面基地建築資材



フェムト秒レーザー加工技術

Femtosecond Laser Processing

藤田雅之 招へい教授(レーザー技術総合研究所)

共同者: 染川智弘招へい教授(レーザー技術総合研究所)、宮永憲明名誉教授(大阪大学)

超短パルスレーザーを用いた微細加工

100フェムト秒という短い時間にエネルギーを集中できるフェムト秒レーザーパルスは、熱変成を伴わない微細加工のツールとして注目されている。フェムト秒レーザーパルスはエネルギーが小さくてもピーク強度が高いため、照射フルーエンスに応じて様々な加工現象が発現することが分かってきた。

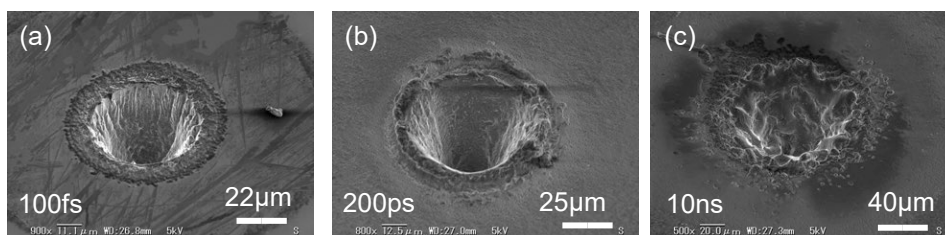
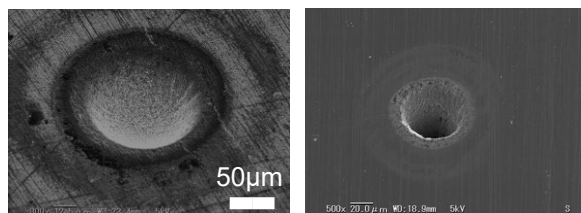


図. パルス幅による加工痕の比較

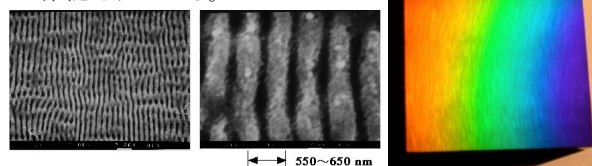
応用1 熱影響が無視できる微細加工

フェムト秒パルスは試料表面でプラズマが発生する前にレーザー照射が終わるために、固体表面でのみエネルギーが吸収され、熱影響が無視できる加工が可能となる。



応用2 材料表面への微細周期構造形成

加工しきい値近傍の低フルーエンスでフェムト秒レーザーパルスを物質表面に照射すると、周期が波長程度の微細な溝構造が自発的に形成される。このような微細構造を摺動面にほどこすと、摩擦係数が低下することが実験的に確認されている。



応用3 半導体の表面改質

加工しきい値以下のフルーエンスで単結晶Siの表面を照射すると、アモルファス層が形成される。

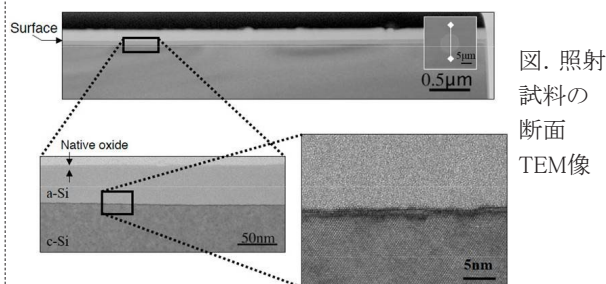


図. 照射試料の断面TEM像

応用4 CFRPの微細加工

レーザー加工による熱影響を受けやすい炭素繊維強化複合材(CFRP)に対しても、フェムト秒パルスを用いれば100 μm以下の微細加工を施すことができる。

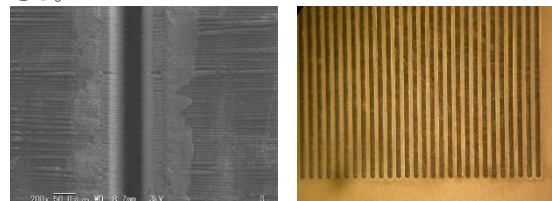


図. CFRPへの溝掘り加工とスリット加工(幅300μm)

グループHP <https://www.ilt.or.jp/>

キーワード 微細加工、周期構造、アモルファス化/結晶化、CFRP



レーザー加工技術

Laser Processing Technology

藤田雅之 招へい教授(レーザー技術総合研究所)

共同者: 染川智弘招へい教授(レーザー技術総合研究所)、宮永憲明名誉教授(大阪大学)

レーザーと物質の相互作用を加工に応用

近年、レーザーのパルス幅は連続光からフェムト秒パルス光まで広い範囲から選べるようになってきている。連続光を用いることで各種材料の接合が可能となり、パルス光を用いると様々な材料の微細加工が可能となる。レーザーとプラズマの相互作用の基礎知識とレーザー開発の実績をもとに、将来的なレーザー開発の動向を考慮して研究テーマを展開している。様々な複合材、合金、セラミックス、ガラス、木材、石材、コンクリートなど製造現場で用いられている素材を対象として、産業界のニーズに対応した共同研究開発も手掛けている。

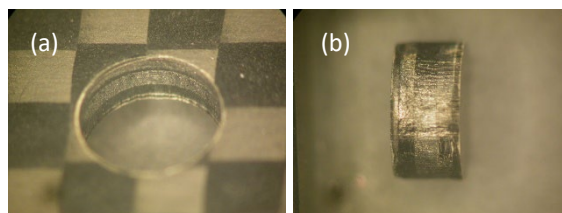
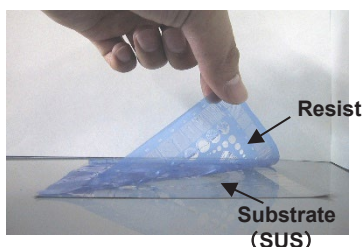


図. パルス幅200psのレーザーでCFRPを加工

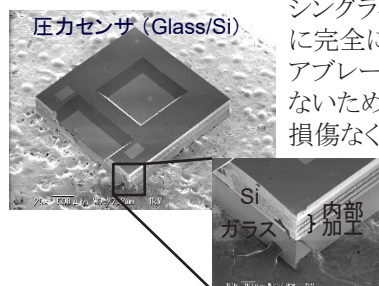
応用1 レジスト剥離

適度な強度のパルスレーザー光を照射すると、金属基板からレジスト膜が剥離する現象が見出された。レジスト膜はレーザー照射により蒸散するのではなく、その形状を保ったまま基板から剥離される。



応用2 MEMSウェハのダイシング

MEMSウェハの代表的な構造であるガラス/Si接合体を微小チップにダイシングする技術を開発した。ダイ



シングラインは内部クラックに完全に沿っており、表面アブレーションを行っていないため、デブリフリーで損傷なく切断できている。

応用3 レーザークリーニング

連続光を高速スキャナと組み合わせることで、熱影響を抑制した材料表面の除去加工が可能となる。金属のさび取り・塗膜除去や木材の表面塗装の除去にも適用可能である。

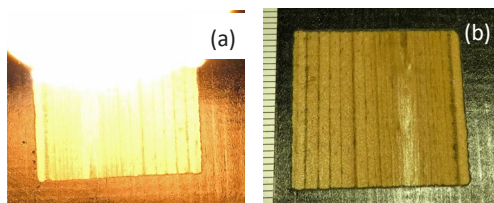


図. 木材塗装のクリーニング:(a)照射中の様子、(b)照射後

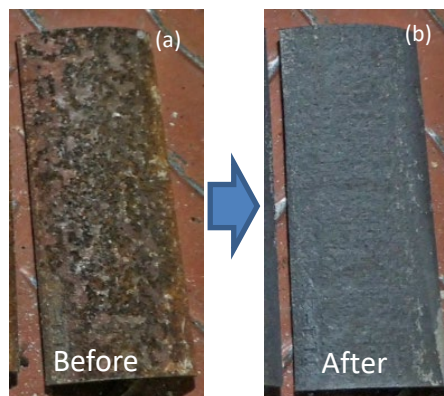


図. 錆びた鋼材のクリーニング:(a)照射前、(b)照射後

グループHP

<https://www.ilt.or.jp/>

キーワード

レジスト剥離、レーザーダイシング、レーザークリーニング



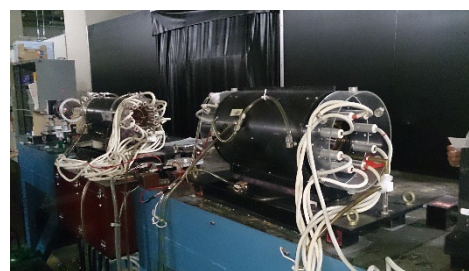
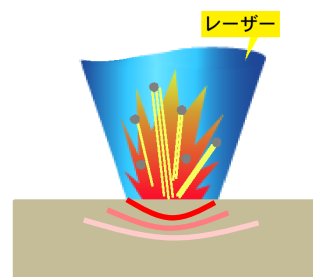
高密度プラズマによるレーザートリートメント

Laser treatments with high-power laser irradiation

重森啓介 教授

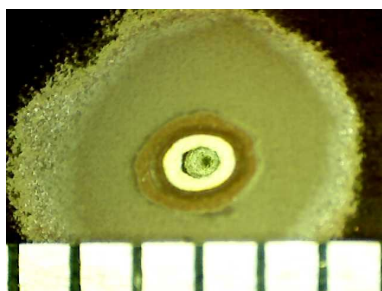
ハイパワーレーザーによって発生する高密度プラズマ

ハイパワーレーザーを物質に照射することにより、他の手法では得ることのできない高温・高密度、そして高圧力のプラズマ状態を創り出すことができます。この高密度プラズマは学術的に興味深いだけでなく、様々な分野への応用が期待されています。この高密度プラズマによって物質表面が高温に加熱されるため、物質表面を剥離することができます。また、高密度プラズマによって物質が高圧力に加圧されるため、物質中に大きな残留応力を与えることができることから、材料を強くする「レーザーピーニング」が可能です。これらの技術を用いることにより、材料に対して高い付加価値を与えることができます。



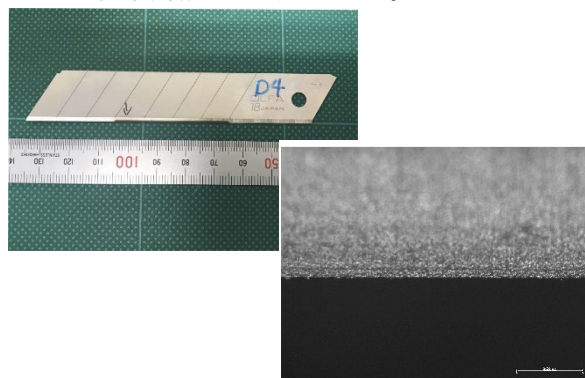
応用1 大面積レーザークリーニング

ハイパワーレーザー照射によって物質表面を剥離する「レーザークリーニング」技術はその応用領域が広がりつつあります。しかしながら、その剥離プロセスは明らかになっておらず、剥離対象の物質やレーザーの照射パラメータに大きく依存します。我々は大出力レーザーの持つ強みを利用し、より大面積の一括クリーニングや学理に基づく照射パラメータの最適化の研究をすすめるとともに、これを一般化するためのクリーニングプロセスの高精度計測、およびそのデータベース構築を行っています。



応用2 レーザーピーニングによる材料の強靱化

ハイパワーレーザー照射によって材料内部に衝撃波が伝播し、強い応力(圧縮力)を与えることができます。この残留応力によって材料を強靱化することができるため、「レーザーピーニング」として実用化がすすめられています。我々はこの技術を金属の耐摩耗性を向上させる応用の可能性の一つとして、刃物の刃先にピーニング処理を行うことにより、切れ味の長期間維持を実証しました。



次世代光学材料探究とレーザー・超伝導応用研究

Materials Development and Applications of Lasers and Superconductivity

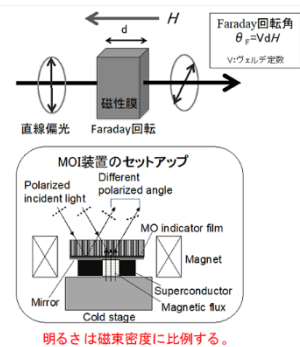
筑本知子 教授

次世代光学材料の探究

次世代パワーレーザー応用においては、低欠陥密度化による熱損傷の低減および熱伝導特性の向上による冷却効率の向上が必要不可欠です。そこで、本質的に熱特性の優れた材料の探究を微量元素置換等によってすすめています。(本研究は本研究所極限材料科学グループと東北大学金属材料研究所との共同研究によって進めています。)

磁気光学イメージング法による磁場分布可視化

磁気光学イメージング(Magneto-Optical Imaging; MOI)法は、磁気光学効果の一つであるFaraday効果を利用して、磁束密度分布を光学的に観察する方法です。MOI法では面内に磁化容易軸をもつ面内磁化膜を用いると、Faraday回転角 θ_F が磁性体に垂直な磁場に対して連続的に変化するため、入射側と検光子側に2枚の偏光板をクロスニコル配置することによって、磁場強度を光の強度の変化として測定することが可能となります。



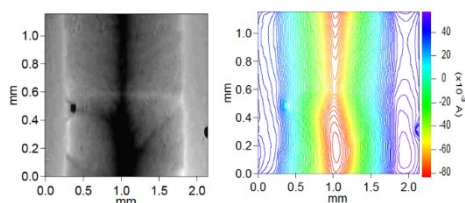
超伝導直流送電システムの研究

高温超伝導を利用した直流送電は、原理的に大電流を低損失でコンパクトに送電できることから、炭酸ガス排出削減の他、送電ケーブルのコンパクト化による環境破壊の低減や省資源化等が期待され、カーボンニュートラルの実現にも大いに貢献できる技術です。ここでは長距離システムの実現に欠かせないケーブル接続技術について、常温拡散接合技術についてご紹介します。

応用1

磁気光学イメージング法による超伝導材料の電流分布評価

下図はMOI法により、超伝導接合した試料の磁場分布を測定し、その磁場分布から電流分布を計算した例です。このように、MOI法は磁場分布や電流分布の可視化が可能な方法であり、これを用いて、超伝導材料や磁性材料の磁場や電流特性の探究を行います。

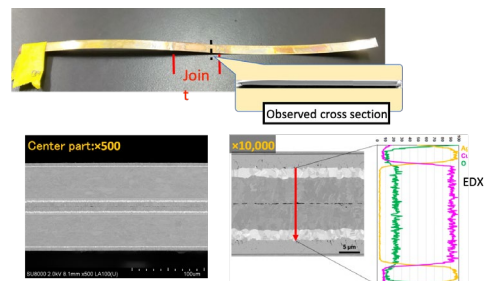


MOI法による超伝導接合試料の磁場分布測定例。左: MOI像 右: 電流分布

応用2

化学的表面活性化による高温超伝導線材の低温接合技術

高温超伝導応用のボトルネックの一つが線材をいかに簡便に低抵抗接続できるかです。本研究では、RE123系超伝導線材の銅安定化層同士を化学的表面活性化により200℃程度の低温で直接接合することに成功しました。



RE123線材接合試料の外観と断面SEM-EDX像

グループHP
キーワード

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/mat/>
次世代光学材料、磁気光学イメージング、超伝導応用、活性化金属接合



レーザー核融合システムグループ

トリチウムを使った基礎から応用研究、材料の非破壊検査

Tritium processing and applications

山ノ井航平 准教授

核融合燃料開発

核融合では極低温で固体にした重水素と三重水素（トリチウム）を燃料に使用します。トリチウムは水素と同じ化学的性質を持っており、15keV程度の弱いベータ線（電子）を出す放射性物質です。レーザー科学研究所には国内で最大量（1日30テラベクレル）のトリチウムを使用できる施設があり、固体状態でのトリチウムの物性評価や応用利用研究を行なっています。



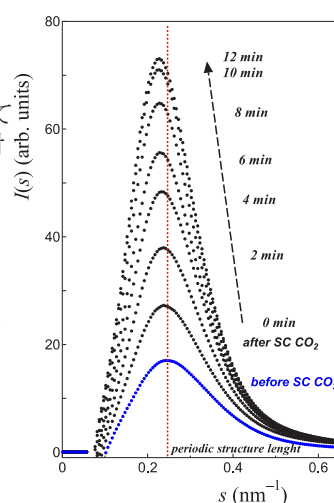
日本最大のトリチウム利用設備

応用1 トリチウムの利用・解析

トリチウムは水素と同じ性質を持ち、放射性物質であるため、放射能検出によって検出が容易です。水素をトリチウムに置き換えることで、水素のイメージングが可能です。その他にも環境中トリチウムのモニタリング技術の開発、トリチウムの回収除去技術の開発と装置性能評価、材料中のトリチウム挙動の解析などが可能です。レーザー科学研究所では、日本で唯一、トリチウムを極低温で固体にした実績を持つなど、大容量のトリチウムを安全に取り扱うことができます。

光と放射線を使った材料評価

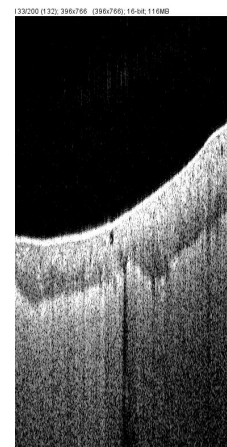
光や放射線を用いて、無機、有機、結晶、アモルファスを問わず、あらゆる材料の分析を行っています。右の図は、放射光施設にて高圧下での樹脂の破壊を構造的にリアルタイムで観測した例です。この他にも、放射線による損傷や材料の非破壊検査技術の開発を行っています。



K. Yamanoi et. al., J. Supercrt. Fluid. (2021)

応用2 非破壊・自動検査技術

放射線や光を用いることで、あらゆる材料の分析をすることができます。つまり、最適な手法を用いることで、製品や材料の形状検査、欠陥検査、断層画像検出が可能です。

セラミック材料の
非破壊断面観察例グループHP <https://www.ile.osaka-u.ac.jp/research03/lfs/>

キーワード トリチウム、材料評価、非破壊検査



超高強度場科学グループ

高強度パルス極端紫外(XUV)光による
物質アブレーション応用と光電離光解離プラズマ物理Application of materials ablation by intense pulsed extreme ultraviolet radiation
and physics of XUV-induced plasma

田中のぞみ 特任講師

共同者: 藤岡慎介教授、西原功修名誉教授(大阪大学)、安田清和講師(工学研究科)

XUV光と物質の相互作用と、XUV生成プラズマを理解し材料加工に応用

高い光子エネルギー (~100 eV)

→ ワイドバンドギャップ(WBG)材料や誘電体のバンドエネルギーを上回る。内殻電子励起、電離が主体の光電離プラズマ。

極浅表面での吸収 (固体吸収長 数10 – 数100 nm)

→ 吸収係数が大きい。極表面界面への集中的なエネルギー付与。透明材料が無い。

固体密度を上回る臨界密度 (10^{24} cm^{-3})

→ 実質的にカットオフ密度が無いため、長パルスでも継続的に固体領域に直接エネルギーを付与。

短波長 (1-100 nm)

→ 回折限界の短さから微細加工に有利。EUVリソグラフィ技術に応用されている

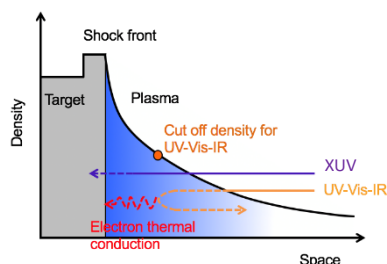
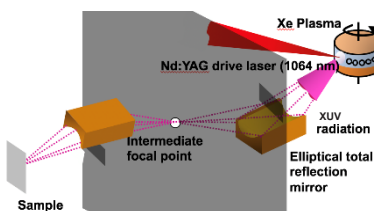


Fig. 1 光子エネルギー吸収の違い

Fig. 2 レーザープラズマXUV光源と集光系。
N. Tanaka et al, HEDP 37, 100865 (2020)他mJ領域の高エネルギー、 10^9 W/cm^2 の高強度パルスXUV光を供給

応用1

物質のXUVアブレーション応用
と、アブレーションプラズマ物理

レーザープラズマXUV光源の高出力XUV光を集光することで、一光子による光電離・光解離と続くアブレーションが可能である。本グループでは世界でも数少ない高出力XUV光源とXUV集光光学系を用いてXUV光による加工やアブレーションプラズマ利用の応用研究を行なっている。更に従来光が困難とする材料の加工技術への応用を目指している。このようなプラズマは固体密度付近の高密度、1 eV付近の低温という特殊状態を示し、学術的側面からも興味深いプラズマを提供している。

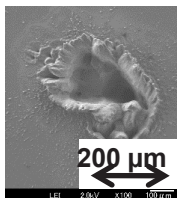


Fig. 4 Si XUVアブレーション痕

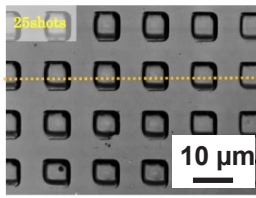


Fig. 5 ポリマー材へのXUVアブレーションによる直接加工

N. Tanaka et al, Appl, Phys, Lett., **105**, 114101 (2015)
N. Tanaka et al, Appl, Phys, Lett., **124**, 152113 (2024) 他

応用2

高フルエンスEUV光による表面
改質と異種材料間界面形成

高出力LPP光源からのXUV光を高フルエンスで用いることで、アブレーションを伴わない透明材料を含む極浅表面の処理が可能となる。例えば、基材の表面に塗布した異種材料との界面創出、ポリマー基材バルク領域の熱変性を伴わない深さ方向に局所的な改質の基礎実験を行なっており、透明材料表面へのパターン形成、膜処理、異種材料接合などの可能性を示している。

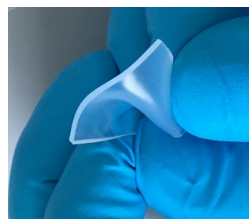


Fig. 6 透明、フレキシブル材料であるPDMSシート。生体適合性が高い。



Fig. 7 金属ナノ粒子担持ポリマー表面へのXUV光照射により、界面創生が示された。

K. Yasuda et al., IEEE Explore, ICEP-IAAC, 535 (2018) 他

グループHP <https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research02/lf/>

キーワード EUVリソグラフィ、極端紫外光、光電離プラズマ、材料加工



レーザー駆動真空紫外(VUV)光による光解離過程の応用

Application of photo dissociation process by vacuum ultraviolet radiation from laser produced plasma

田中のぞみ 特任講師

共同者: 藤岡慎介 教授、西原功修 名誉教授、James Edward Hernandez 特任研究員
城崎知至 招聘教授 (広島大学)、砂原淳 招聘准教授 (パデュー大学)

光子エネルギー10 eV以下の真空紫外光(Fig. 1)は、イオン化やプラズマ状態を介さずに効率的に分子を直接解離する。この領域の原子分子過程を応用するには高出力の光源が必要となる。特に高出力の光は光源の選択肢が少ないことで知られている。レーザープラズマ光源は操作性が高く、非接触であり、コンパクトな装置で高強度高フルエンスという、産業応用に最適な特性を備える。

真空紫外光による光解離を用いることで、例えば高い光解離断面積(Fig. 2)を利用し、効率的にラジカルを生成することができる。水素ラジカルは反応性が高く、シリコン(Si)と結合しSiH₄を形成することによるエッチング、CH₄形成による精密機器内のカーボン汚染除去などに利用されている。

本研究では波長可変のレーザープラズマ駆動真空紫外光源の開発、真空紫外光集光光学系の開発、産業応用にに向けた水素ラジカル生成の成果を上げている。

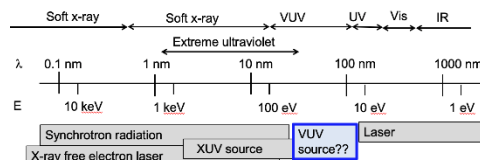


Fig. 1 各波長帯とその光源。真空紫外光はレーザーの短波長側限界と放射光の長波長側限界に位置する。

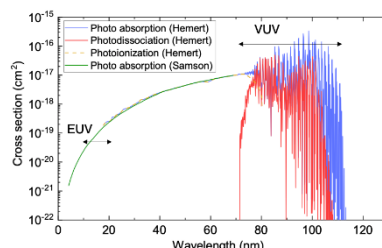


Fig. 2 水素ラジカル生成断面積。光解離過程の方が光電離よりも2桁ほど断面積が大きい。

https://home.strw.leidenuniv.nl/~ewine/photo/display_h2_ca2bf3f6b7e18a508253e9521510a4b5.html

応用1

放射波長域可変のレーザープラズマ光源開発

現在、波長100 nm、光子エネルギー10 eV付近の真空紫外帯域を提供する光源を得ることは難しい。レーザープラズマ光源を用いることで、高強度高効率、かつ小さいフットプリントでの真空紫外光発生が可能となる。駆動レーザー強度を変化させることで光源プラズマの温度密度を制御し、希望する帯域のスペクトルを得ることができる。極端紫外領域から120 nm帯までの放射が得られることを、二次元輻射流体コードを用いて示した(Fig. 3)。現在はスズの光源を用いて、実験的に特性評価を行なっている。

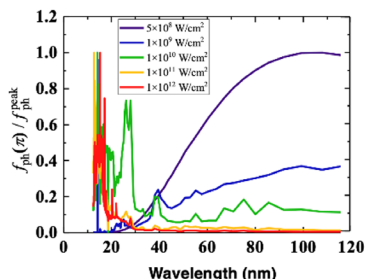


Fig. 3 各駆動レーザー強度に対する波長スペクトルシミュレーション結果。

応用2

光解離を利用した高効率水素ラジカル生成

汎用性の高い水素ラジカルを実験的に生成した。レーザー強度を10¹¹ W/cm²から10⁹ W/cm²に減少させることで間接的に放射を長波長側に制御。反応断面積の特性を利用してラジカル生成効率を増大した(Fig. 4)。光源に集光系を設置することで高フルエンスの真空紫外光の利用を可能にし、高密度(10¹⁴ cm⁻³ @ 5 Pa水素ガス)の水素ラジカル生成を示した。

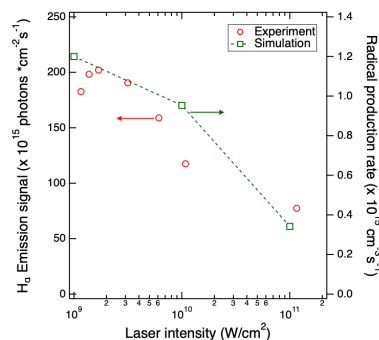


Fig. 4 可視分光による水素発光スペクトル強度の推移。レーザー強度を減少させることで、スペクトル強度が増加、ラジカル生成効率も増加することが確認された。

N. Tanaka et al, Appl, Phys, Lett., **124**, 152113 (2024).
J. E Hernandez et al, Appl, Phys, Lett., **124**, 012101 (2024).

グループHP
キーワード

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research02/lf/>

光解離プロセス、真空紫外光、ラジカル

