

コヒーレントビーム結合とファイバーレーザー

椿本孝治 准教授

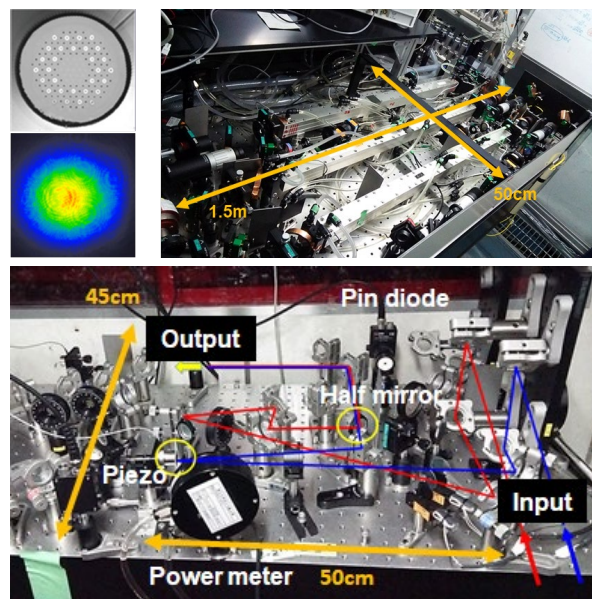
共同者: 吉田英次 特任研究員

加工に適した高繰り返しレーザー

金属等の加工においては、高スループット、高精度・微細加工と多様な素材対応、加工ヘッドのコンピューター制御との同期等の加工性能が望まれ、それぞれの要求に対応するレーザー性能としては、高平均出力と高効率、高ビーム品質・短パルスと短波長、パルスの高速ON/OFFスイッチ制御が上げられる。

工業製品における多様化、小型化、高集積化、高機能化に対応できるものづくり技術として、高精度・高速微細加工が必要不可欠である。そのためのツールとして紫外域のピコ秒パルスレーザーが有用であるが、市販レーザー（繰り返し100～300kHz、平均出力5～6W程度）では高スループット加工は望めない。複雑な多段増幅システムを避けて高繰り返し・高出力を達成するにはファイバー増幅器が有効である。

微細加工のためには、パルスのON/OFFスイッチングや振幅変調が必要である。また、加工性能の向上に有用なバーストモード動作についても、バースト時間幅の高速制御が重要である。



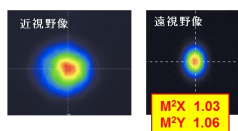
応用1 紫外ピコ秒パルスによる微細加工

波長変換技術を利用し、世界最高出力の3倍高調波の発生に成功した。独自に開発した結晶冷却技術により、波長347nm、パルス幅285ps、平均出力300Wの紫外パルスレーザー光を供給できる。

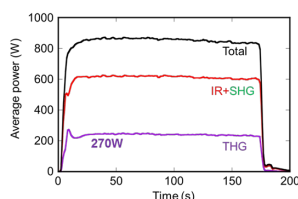
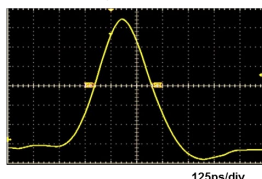
紫外ピコ秒パルスレーザーは、非熱加工が可能であり、微細加工に適している。



346.7 (nm)-100W



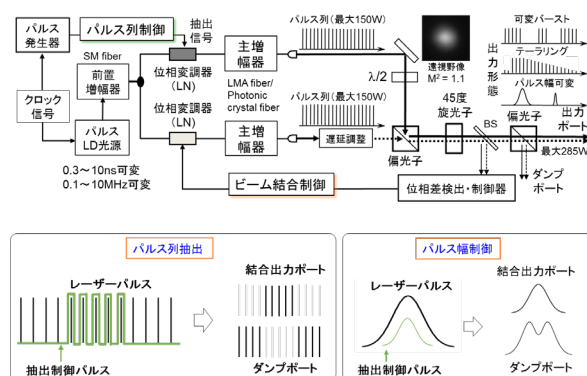
3rd harmonic: 275 ps-10MHz



応用2 任意パルス制御による高性能加工

加工用レーザーでは、高ビーム品質、高安定性、高平均出力の他に、加工機との親和性も要求される。そのため、100Wを超える平均出力でも適用可能な、高速パルス整形、切り出し、スイッチング技術を考案し、開発している。

バーストパルス列による加工では、連続パルス列よりも加工性能がよくなる。



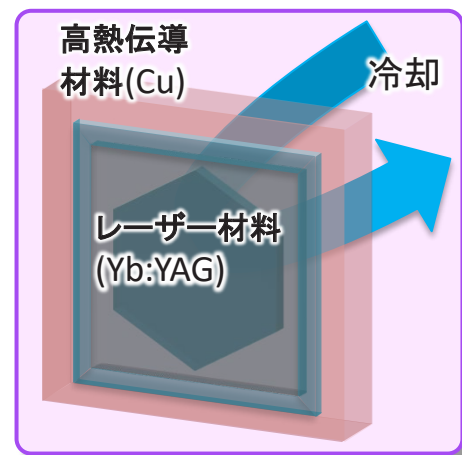
アクティブミラー型レーザー増幅器を用いたパワーレーザー (～10 kW)

余語覚文 教授

共同者：椿本孝治准教授、荻野純平助教、時田茂樹教授(京都大学)

アクティブミラー型レーザー増幅器

アクティブミラー型レーザー増幅器の利点は、ロッド型やスラブ型など他のレーザー増幅器に比べて圧倒的に高い排熱能力と熱に影響されにくい高いビーム品質にあります。また、径方向への面積を拡大することでパルスエネルギーの増力が簡単であるだけでなく、上述の利点は保持されますので、従来にないハイパワーレーザーが実現できます。



応用1 レーザー加工

パルスレーザーによる塗料の剥離、サビ取り、酸化膜除去、前処理などのレーザークリーニングは溶剤や研磨剤など余計な副産物を出さない、クリーンで高品質な加工を実現します。また、疲労強度や耐応力腐食性、耐摩耗性など金属表面の耐力を向上させるレーザーピーニングは、航空機や炉壁など厳しい環境下に耐える高い強度を実現しています。その他にも多彩な加工用途に利用が可能です。



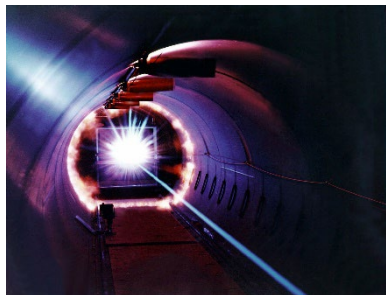
応用2 医療応用 (レーザーメス、美容整形、歯科)

しみ抜きや脱毛、あざ治療など美容整形をはじめとして内視鏡と組み合わせて膀胱、肺、消化管などの内部にある腫瘍などの治療、尿路結石破碎、歯科治療などに利用可能です。



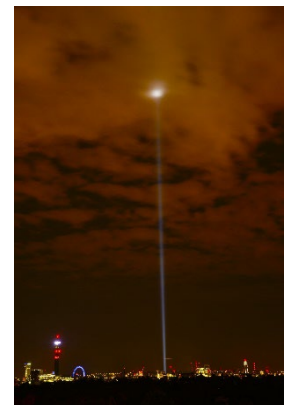
応用3 レーザー打音検査

トンネル内壁、コンクリート橋梁、ビル外壁などの内部異常はこれまで人による打音検査が主でしたが、レーザーを用いることで遠隔から高速で検査できます。



応用4 ライダー

大気中成分や浮遊微粒子、例えばPM2.5やオゾン、窒素酸化物など、によるレーザー光の散乱や吸収蛍光を利用して対応する物質の濃度空間マップを作ることが可能です。



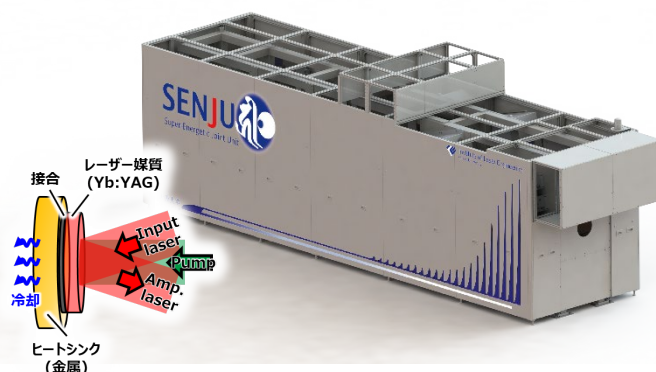
大口径アクティブミラー型増幅器とビーム結合技術を用いた ハイパワーレーザー(> 10 kW)

余語覚文 教授

共同者：椿本孝治准教授、荻野純平助教、時田茂樹教授(京都大学)

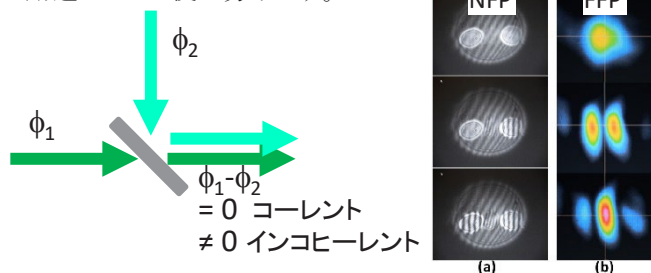
大口径アクティブミラー型増幅器

アクティブミラー型レーザー増幅器の利点は、ロッド型やスラブ型など他のレーザー増幅器に比べて圧倒的に高い排熱能力と熱に影響されにくい高いビーム品質にあります。これらの利点は口径化によるパルスエネルギー増力によって損なわれることはありません。大口径化の際にレーザー媒質と冷却板材料の熱膨張率に起因する接着剥離を阪大独自の技術により回避することで高パルスエネルギー化を実現しました。



ビーム結合技術

様々なインコヒーレントおよびコヒーレントビーム結合技術はレーザーパルスエネルギーと繰り返し周波数を増加させる有効な手法です。エネルギーの足し合わせだけで良いような場合はインコヒーレント結合、高い電界強度が欲しいような場合は位相を揃えたコヒーレント結合を用いるなど、用途によって使い分けます。



応用1 レーザー粒子加速(先端医療応用)

イオンや中性子をはじめとした高エネルギー粒子を用いたガン治療は他の生体組織を破壊することなく疾患部のみを狙い撃ちでき、治療効果が極めて高く治療期間が短い先進医療です。



重粒子線によるガン治療

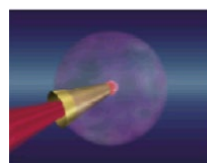
応用2 宇宙デブリ除去



使われなくなった人口衛星や打ち上げに使われたロケットおよびその一部、デブリ同士の衝突で生まれる微細デブリなどのスペースデブリは地球衛星軌道上を秒速3~8 kmで動いており、動作中の衛星や宇宙ステーションなどが破壊、破損の危機にさらされる要因となっています。レーザー照射により減速させ地球大気に再突入させて除去する研究が進行中です。

応用3 レーザー核融合 (未来のエネルギー)

レーザーを重水素や三重水素を照射し、高密度、高温にすること核融合反応を誘発させ発生するエネルギーを利用します。反応後の生成物はヘリウム



であり高レベル放射性廃棄物ではありません。同じ質量であれば核融合反応で得られるエネルギーはウランを用いる核分裂反応の場合と比較して4倍以上大きなエネルギーが得られます。



超小型パワーレーザー

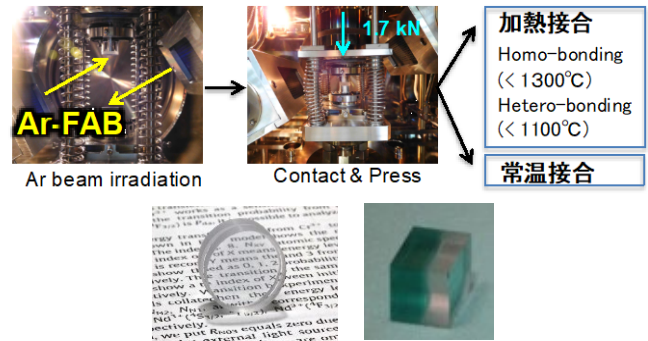
余語覚文 教授

共同者：藤岡加奈准教授、椿本孝治准教授、荻野純平助教

高精度接合技術(常温・加熱)

様々な光学素子を接合することでレーザー装置の小型化が実現できます。大阪大学では量子科学技術研究開発機構(QST)と共同で常温での強固な接合技術を開発した。この技術を利用してレーザー材料と高熱伝導材料を張り合わせることで排熱効率を向上させ高平均出力動作を、また、過飽和吸収材料を張り合わせることで受動Qスイッチ発振などの高性能化、高機能化を超小型装置で実現することに成功しています。レーザー材料や非線形光学材料を選ぶことで比較的幅広い範囲で波長を選ぶこともできます。

接合プロセス



応用1 レーザー治療・検査(美容、成形)

切開や内視鏡的切開、光線力学的治療など比較的低出力のレーザーによるレーザー治療が携帯サイズのコンパクトな装置にて実現できます。レーザー材料や非線形光学材料を選ぶことで比較的幅広い範囲にわたる波長が利用できます。



応用2 映像(プロジェクター)・照明

大規模プロジェクションマッピングなどに使用される光源は超高压水銀発光ランプですが、これを超小型レーザー光に変えることで色再現性や小型化はもちろんのこと、さらなる高輝度化が期待できます。



応用3 レーザーガイド補償光学系

レーザー光を遠方の対象物付近に照射しその散乱光を受光して大気中のゆらぎを観測し補正することで対象物を正確に観測できます。下図は大型望遠鏡に装備されたレーザーガイドスターの様子です。



応用4 小型装置による多彩な造形

3Dプリンティングに代表される造形ですが、比較的高いパルスエネルギーが得られることから樹脂のみならず金属の造形が可能です。また、表面処理などのレーザー加工と組み合わせることで高機能な造形が一台の小型装置で期待できます。



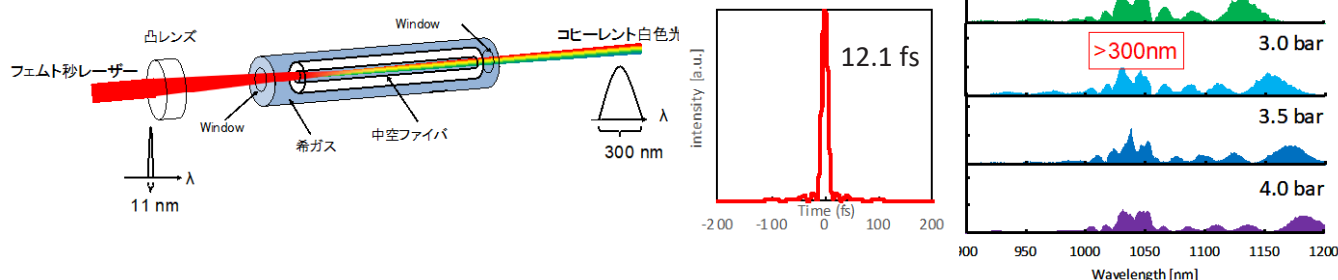
コヒーレント白色光源

余語覚文 教授

共同者：椿本孝治准教授、荻野純平助教、時田茂樹教授(京都大学)

フェムト秒レーザーによる非線形効果

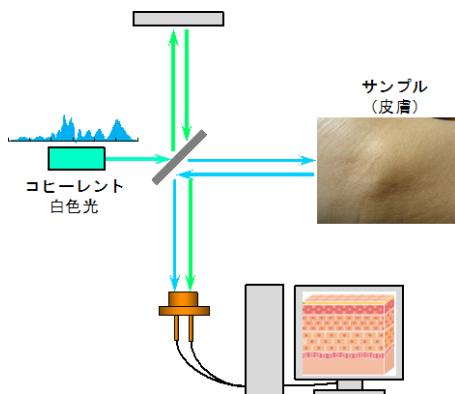
自己位相変調を利用したスペクトルの広帯域化はQ-スイッチレーザーの誕生の頃から研究され、フェムト秒レーザーの誕生によって容易に実現できるようになりました。現在では、位相整合条件やチャネリングなどの技術を使って気体、液体、固体の様々な材料を利用することで様々な波長域、帯域幅で実現可能となっています。大阪大学では、発生過程と位相整合を詳細に解析することで単一ステージでは世界最高のスペクトル帯域を発生することに成功しています。エネルギー変換効率も高く、様々な用途への応用が期待できるものと期待しています。



応用1

生体観測 (光コヒーレンストモグラフィー)

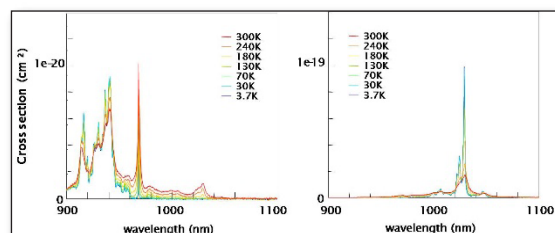
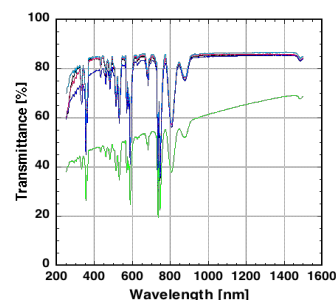
光源による干渉計を用いてイメージを得る光コヒーレンストモグラフィ (Optical Coherence Tomography: OCT) は、生体表皮から1~2mmの深さでおよそ10 μmの高い空間分解能な断層イメージを得ることができます。光源に超広帯域のコヒーレント白色光を用いることでさらに超高速かつ超高分解能で生体組織を観測することが可能です。



応用2

超広帯域光学特性評価

コヒーレント白色光はスペクトル帯域が極めて広いことから様々な材料の吸収・蛍光スペクトルの観測が簡単に行えます。また、制御されたスペクトル位相を利用して透過・反射光学材料のスペクトル分散を超広帯域で計測できます。



新領域「ニュークリアフォトニクス」

-非破壊検査から宇宙の謎の解明まで-

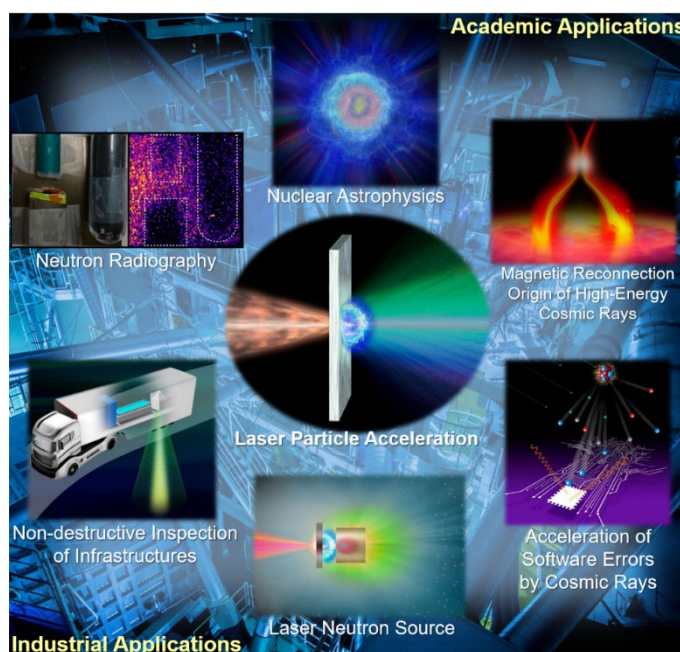
余語 覚文 教授

共同者：有川安信准教授、Alessio Morace助教、早川岳人招へい教授、三間園興招へい教授
岩本晃史招へい准教授、村上匡克教授、重森啓介教授、藤岡慎介教授、岩田夏弥准教授、千徳靖彦教授、

ニュークリアフォトニクスとは？

本研究では、「ニュークリア (Nuclear)」の意味するところである原子核を、フォトニクスの技術を使って制御・操作することで、これまでにない学術研究・応用研究を展開することを目的としています。原子核をレーザーの電場で直接引き剥がすには極めて高い強度のレーザーが必要であり、現在のレーザー装置では達成できません。しかしながら、高強度レーザーによって発生した2次粒子(イオン・電子)あるいは光(高エネルギーX線・ γ 線)を用いれば、原子核を制御・操作することが可能になります。

社会実装を目指した産業応用研究から、宇宙物理のような科学応用研究に跨る広い領域を、ニュークリアフォトニクスというキーテクノロジーによって結びつけ、同時並行的に研究開発を推進します。



応用1 レーザー粒子加速

レーザーの光を極めて短い時間(およそ1兆分の1秒)に小さい領域(毛髪の断面くらい)に集中して物質に照射すると、極めて強い電場や磁場が発生します。この電場を利用して、イオンを高いエネルギー(数千万電子ボルト)まで加速することで、粒子線がん治療加速器への応用が期待されます。また、極低温に冷却した純粋固体水素(あるいは重水素)薄膜にレーザーを直接照射することで、陽子・重陽子加速を効率化します。将来的には小型の陽子線がん治療装置への応用が期待できます。



応用2 レーザー駆動中性子源

中性子はX線が苦手とするシリコンや金属に対する透過力が高く、水素、水や有機物などを検出できます。我々は指先サイズで短パルス・高輝度の中性子フラッシュを発生できる「レーザー中性子源」を開発し、「いつでも・どこでも」利用できる中性子分析を実現しました。橋梁、トンネルの錆・浸水の非破壊検査、水素インフラ施設の保全技術や、動作中の燃料電池・水素エンジンにおける水素の可視化、電極温度の透過計測が可能となります。国際原子力機関(IAEA)「レーザー中性子源諮問委員会・技術委員会」日本代表として、国際的な開発・標準化を推進しています。



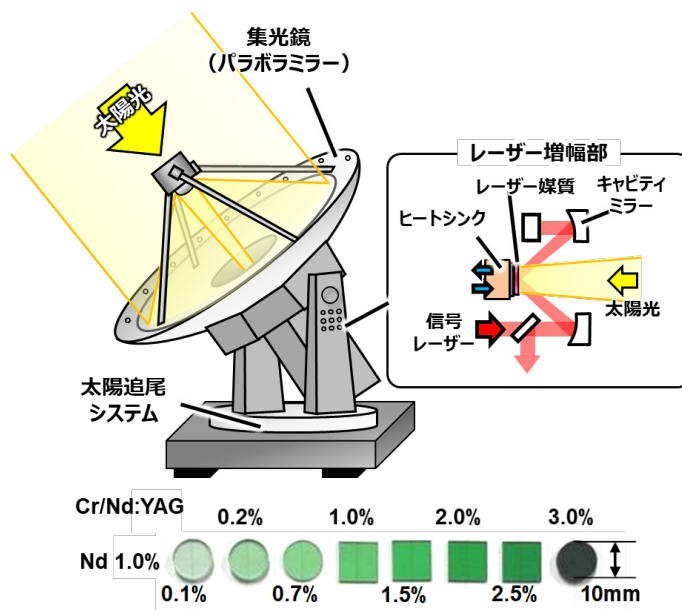
太陽光励起レーザー

荻野純平 助教

共同者：藤田雅之招へい教授（レーザー総合技術研究所）、余語覚文教授、樫本孝治准教授

宇宙空間でのエネルギー利用

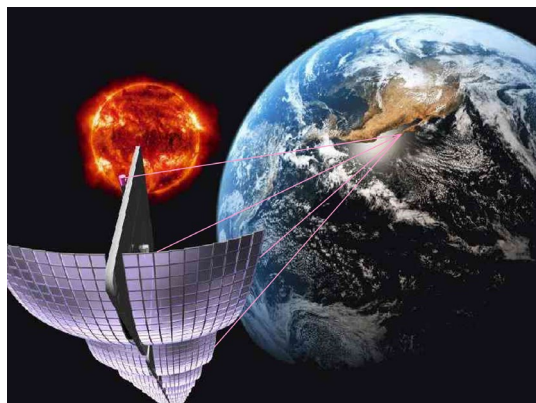
宇宙空間でのエネルギー利用には、太陽光を利用することが重要です。しかしながら、太陽光は発散角を持ち、スペクトル帯域が非常に広いという特徴から、太陽光をそのまま簡便に利用することは困難です。そこで、太陽光をレーザーに変換することが提案されています。本研究では、太陽光励起レーザーの効率向上を目指しており、太陽光励起レーザーのレーザー媒質として有望なCr/Nd:YAGのエネルギー特性・熱特性の解析を行っています。さらに、太陽光励起レーザーの実証実験として地上太陽光を用いたレーザー装置の開発も行っています。宇宙太陽光励起レーザーが実現すれば、宇宙空間での高効率のエネルギー伝送や、宇宙基地開発の建材製造などの応用が可能になります。



応用1

宇宙空間での高効率なエネルギー伝送

宇宙空間で太陽電池パネルを使用せずに、直接太陽光を指向性の良いレーザーに変換し、宇宙空間または地上の発電プラントに伝送する発電システムが提案されています。太陽光のレーザーへの変換は、太陽光直接励起固体レーザーが期待されています。



(<https://www.u-fukui.ac.jp/fukupre/9802/>)

応用2

宇宙基地の建設材料製造

人類の宇宙進出を加速させるためには、月や火星などにおける宇宙基地の建設が必要不可欠です。しかしながら、その建設のための材料を地球から輸送することを考えると、莫大な費用と時間がかかるという問題があります。宇宙基地の建設材料には、月や火星表層に豊富に存在する砂（レゴリス）を用いることが提案されていますが、宇宙環境における簡便な建設材料製造手法は確立されていません。そこで、レーザーを用いた3次元造形により建設材料を製造する手法が提案されています。このレーザーを、太陽光励起レーザーにより提供することで、宇宙基地の建築材料製造を全て地球外にあるもので行う“現地調達・完全地産地消”の製造手法となると期待されています。この手法は、人類の宇宙進出に大きく貢献するとともに、宇宙応用の新分野が開拓されることが期待できます。



作成した
レゴリス焼結材



時空及び位相・周波数制御によるプラズマの最適化

藤岡慎介 教授

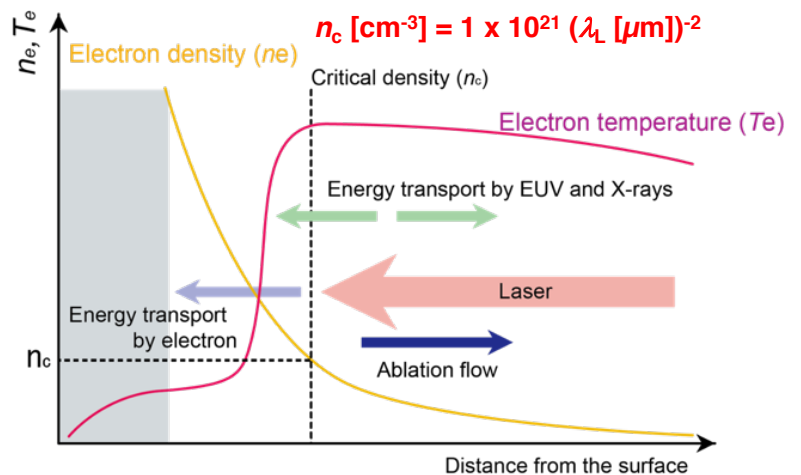
長井圭治特任准教授(金沢大学)、砂原淳博士(米国パデュー大学)、
小島完興主任研究員(量子科学技術研究開発機構)、S. Wilks博士(ローレンスリバモア研究所)

プラズマの最適化の必要性

レーザー生成プラズマは多様な応用の可能性を秘めています。その一方で、レーザープラズマは、非常に高圧力で、高速に運動し、かつ短寿命であるため、それを望むように制御するには一工夫が必要です。

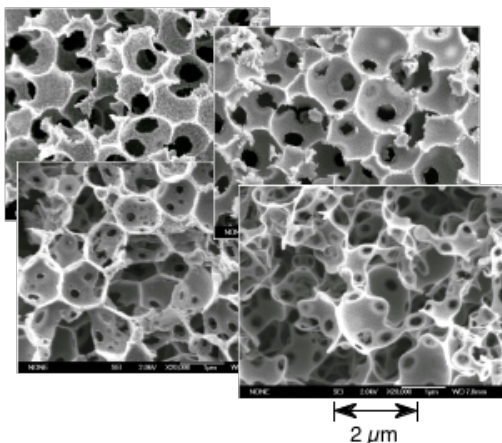
我々は、プラズマを生成するレーザーの空間形状、時間波形、位相及び周波数を変えることで、プラズマの特性を変化させること、またプラズマ源であるターゲットの構造によって、プラズマの特性が変わることを見いだしました。

プラズマ物理の知見を活用し、応用に即したプラズマ最適化を提案することが出来ます。



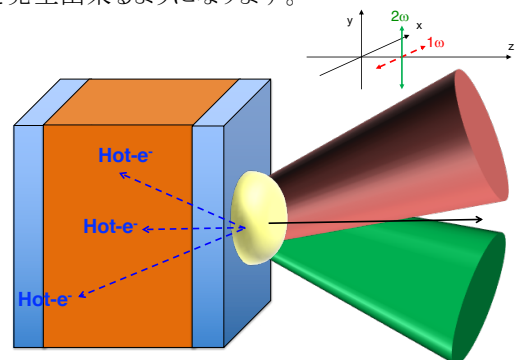
応用1 微小構造ターゲットを用いた、プラズマ光源の高輝度化

ミクロン以下の構造を有するポーラス形状の酸化スズをプラズマ源として利用することで、レーザーから軟X線へのエネルギー変換効率を1.5倍高めることに成功しました。ターゲットの体積平均密度を下げることで、軟X線源プラズマの密度を下げたことが、放射効率の向上に寄与したと考えられています。



応用2 二波長レーザーの混合照射による電子ビーム発生

レーザーの電磁波とプラズマ波動の相互作用の結果、プラズマ中で電子ビームが加速されます。波長の異なるレーザー光をプラズマに同時照射することで、レーザー光とプラズマ波動の干渉を起こし、結果として効率的に高速電子は加速出来る事を見ました。この高速電子を利用することで、レーザーで直接敵に加熱することが難しく、固体密度物質を効率的に加熱することが可能になり、従来のレーザー照射法では達成出来なかった高圧力を発生出来るようになります。



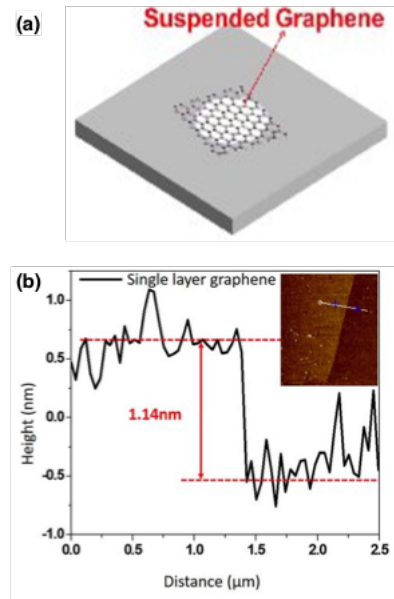
自立グラフェンを用いた高エネルギーイオン加速

蔵満康浩 教授

共同者: Wei-Yen Woon 教授 (台湾国立中央大学)、Nigel Woolsey 教授 (英国 York 大学)、羽原英明准教授、安部勇輝助教、坂和洋一 准教授、金崎真聡准教授 (神戸大)、福田祐仁 上席研究員 (量子科学技術研究開発機構)

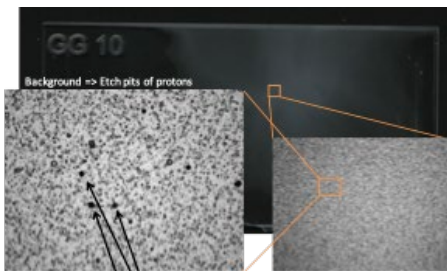
Large-area suspended graphene (LSG)

両面が自由表面のグラフェンターゲット (large-area suspended graphene: LSG) は、世界最薄 (1nm) のターゲットで、平面性が良く、枚数を重ねることで、1nm の精度でターゲットの厚みをコントロールでき、異なるレーザー条件に対し、最適なターゲット厚を精度よく決定できる。また、グラフェンは広範囲に応用されているため、安価に大量生産が可能である。これまでレーザー実験で用いられてきた極薄膜ターゲットと比べ、何桁もターゲットにかかる費用を抑えることができる。さらに、超高強度レーザーと固体ターゲットの相互作用による高エネルギー放射線は、固体中の原子核の数に比例するため、グラフェンターゲットを用いることで、放射能汚染を劇的に軽減できる。グラフェンは同じ厚みのその他の物質よりもはるかに丈夫で、レーザーイオン加速ターゲットに最適である。



応用1 LSGを用いた高エネルギー炭素イオンの加速・生成

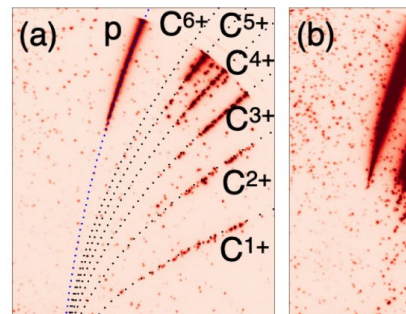
重イオン線治療として用いられるカーボンイオンの加速は、世界中で大規模なプロジェクトにより研究開発が行われており、現在レーザーイオン加速の業界で最も重要な課題となっている。これまでは、比較的厚めの固体薄膜が用いられてきたが、ターゲットの表面に生成される電磁場により、加速が制限されることが知られており、イオン加速は長らく頭打ちとなっていた。高エネルギーまでイオンを加速するために非常に薄いターゲットが必要だと考えられてきた。LSGを用いて最高エネルギーのカーボンイオンを加速する。



カーボンイオン (~700 MeV)

応用2 LSGを用いたイオン源の小型化・低放射化

グラフェンは最も薄い2次元材料であり、最も軽く、最も丈夫な物質である。また、ほぼ透明な光学特性を持っており、これまでのどのターゲットよりもプレパルスに対する耐性があると考えられている。さらに、安価で大量生産が可能であるため。これらの特性を生かし、より小型のレーザーを用いたイオン源の小型化・高繰り返し・低放射化を実現できる。



非相対論的強度でのレーザーイオン加速実験結果



極限プラズマグループ

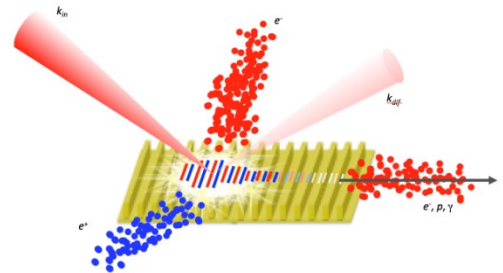
高強度レーザーとナノフォトニクスによる 究極の光強度の実現

羽原 英明 准教授

共同者: 蔵満康浩教授、安部勇輝助教

相対論的ナノフォトニクス

高強度レーザーを物質に照射すると、その強い電場・磁場により物質を瞬間的に蒸発させ、高輝度なX線や高エネルギー粒子を容易に生成することができる。我々はさらに光強度を増強し、GeVクラスの高エネルギーイオンビームや、強力なガンマ線・陽電子線を生成する目的で、ナノフォトニクスの技術を活用し、局所的に数100倍もの光強度の増強を実現させるための研究を進めている。

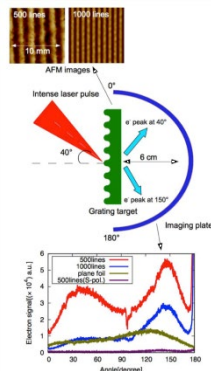


高強度レーザーを金属回折格子に入射することで共鳴的に励起される表面プラズモンと、生成される高エネルギー量子線

応用1 表面プラズモン共鳴電場増強

金属回折格子に高強度レーザーを照射すると、共鳴条件を満たす場合にのみ表面プラズモン共鳴が起こる。共鳴により表面電場強度が増強し、高エネルギー粒子が効率的に生成される。

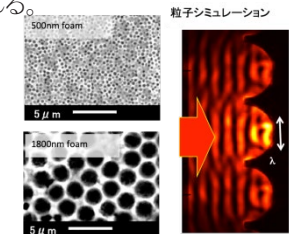
金属回折格子への高強度レーザー照射実験と高エネルギー電子の増大



応用2 マイクロ集光鏡電磁場増強

ナノマイクロサイズの空孔が表面に多数あるナノフォームターゲットに高強度レーザーを照射すると、空孔内部での反射と屈折によりエネルギーが集中し電磁場が増強。それによって高エネルギー電子、イオンが効率的に生成される。

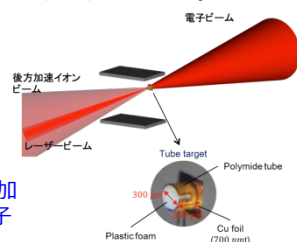
金属ナノフォームSEM画像とフォーム内部での電磁場集中



応用3 低密度ナノフォームイオン加速

1mg/ccの超低密度ナノフォームターゲットに高強度レーザーを照射すると、強い光圧により瞬時に高温高压状態となり、それによってイオンが数100MeVのエネルギーで弾き飛ばされる。

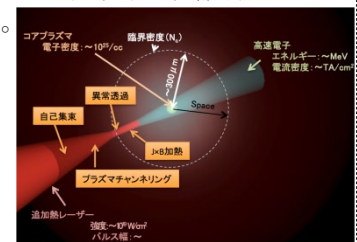
ナノフォームから前後に加速される高エネルギー粒子



応用4 高速点火レーザー核融合

高強度レーザーによって作られる高エネルギー電子ビームを二重水素・三重水素高密度プラズマに照射し、熱核融合反応によりエネルギーを取り出す。同時にエネルギーを電気に変換する核融合炉のデザインも行っている。

周辺の薄いプラズマを切り裂いて高密度の燃料プラズマへと侵入する高強度レーザー

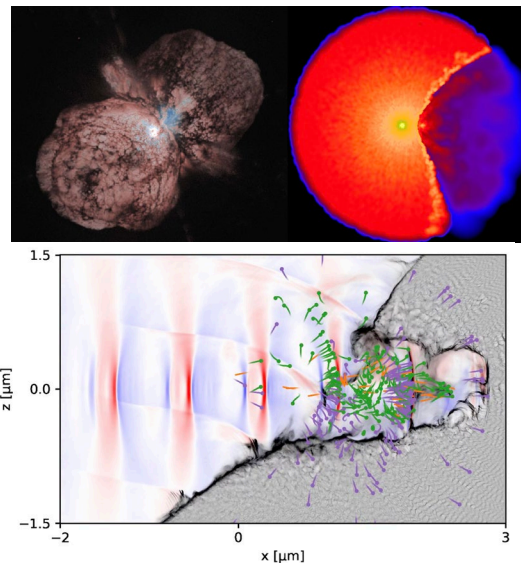


Unveiling the Secrets of the Universe with Extreme Laser Intensities using Relativistic and Curved Plasma Mirrors

Alessio Morace 助教

Introduction

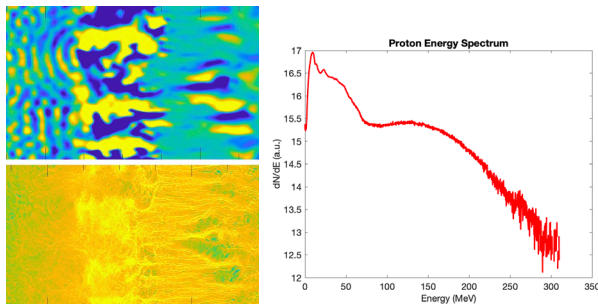
Achieving extreme light intensities is not only a great milestone in its own merit, but it is the key to unveil the secrets of the Universe and a pathway to Fusion Energy. By using Relativistic Plasma Mirrors with femtosecond laser pulses and Curved Plasma Mirrors with picosecond laser pulses, we aim at the creation of extreme laser intensities that will provide a window into Strong-Field Quantum Electrodynamics, Relativistic Electromagnetic Collisionless Shocks, allow for the generation of relativistic proton sources and provide new approaches to Inertial Fusion Energy.



応用1

Relativistic electromagnetic collisionless shocks and near relativistic particle beams

Using Hyperbolic/Ellipsoidal Plasma Mirrors on picosecond, kJ-class PetaWatt lasers is possible to attain intensities exceeding 10^{21}W/cm^2 and establish the conditions for the creation of Relativistic Electromagnetic Collisionless Shocks, dissipating into near-relativistic proton beams. The high laser intensity could also be used for alternative hybrid ignition schemes for Fast Ignition research.



応用2

Relativistic plasma mirrors and the quest for the Schwinger limit

PetaWatt-class femtosecond lasers tightly focused on a Plasma Mirror surface induce instantaneous surface curvature that will focus down harmonic beams to intensities approaching 10^{25}W/cm^2 , capable of revealing Strong-Field QED phenomena and bring us closer to the Schwinger limit. Focused harmonics could be used to trigger Thermonuclear burst in Inertial Confinement Fusion research

