

テラヘルツ分光

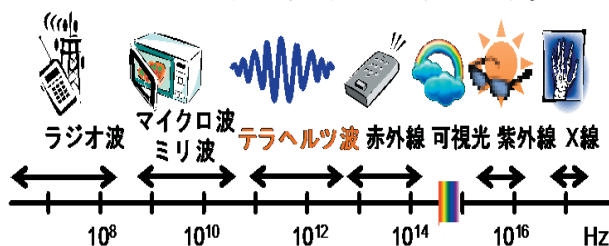
Terahertz Spectroscopy

中嶋 誠 准教授

共同者: 加藤康作特任研究員、V. Agulto特任助教

研究背景

テラヘルツ波は周波数 10^{12} Hz程度の、高い透過性と直進性を併せ持つ新しい電磁波です。紙やプラスチックなどの材料に対して高い透過性がある一方、フォノン、スピン、高分子高次構造の振動モードや自由電子の超高速応答などの観測が可能な波長域です。これらの特徴を利用して、通信、センシング、セキュリティスキャナー、物質評価などへの応用が開拓されています。私たちは、テラヘルツ波の発生や検出技術の開発や、電磁波の伝搬操作、テラヘルツを利用した物性測定やデバイス開発を通してテラヘルツ波工学の発展に寄与します。



期待されるテラヘルツ波応用

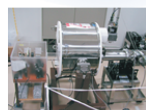
産業応用

- 半導体産業
- 製薬
- 新光学デバイス
- テラヘルツ通信
- 食品産業

基礎物理・化学

- 半導体物性
- 超伝導物性
- 誘電体物性
- ガラスの物性
- フォトニック結晶やメタマテリアルの物性
- 液体物性と化学
- 気体の精密分光
- プラズマ診断

テラヘルツ波技術
 ・ THz発生・検出法
 ・ 光学素子
 ・ 各種分光システム
 イメージング
 などの開発



各種テラヘルツ波分光法開発

新機能光学素子の提案と開発

安全・安心社会の実現

- 違法薬物の検査
- 爆発物検査
- ペットボトル中の液体検査
- 違法ガンガン取り締まり
- 偽札検査
- 煙中の透視(火事場での応用)
- 環境計測(排ガス、有毒ガス監視)

バイオ・医学応用

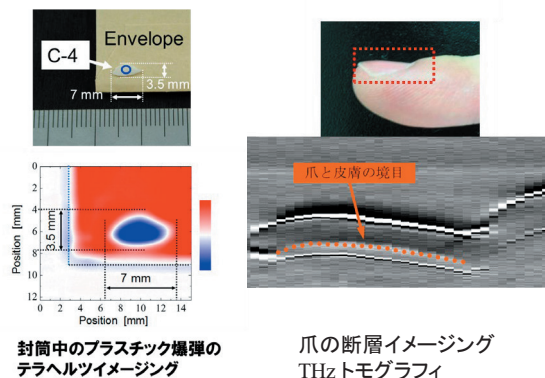
- 生体関連分子の分析
- 遺伝子解析
- タンパク質の昨日解析
- 癌診断
- 医用材料検査
- 火傷診断

応用1

センシング・物質の同定・イメージング

テラヘルツ波は高い透過性と直進性を併せ持つ新しい電磁波です。また、テラヘルツ領域および赤外領域は指紋領域と言われ、物質を同定する特徴的なスペクトルが現れることで知られています。

半導体におけるキャリア評価をはじめ、水分の検出、絶縁体薄膜・フィルムにおける厚み評価、劣化試験、危険物探知(セキュリティ)等への応用が期待されています。



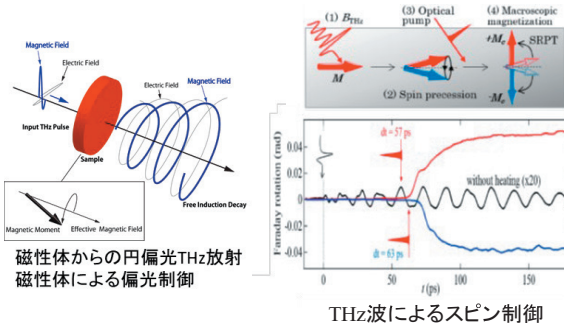
封筒中のプラスチック爆弾のテラヘルツイメージング

爪の断層イメージング THz トモグラフィ

応用2

テラヘルツスピントロニクス

テラヘルツ領域において、磁性体の利用が注目されています。磁性体を利用した偏光制御素子(ファラデー素子)やテラヘルツ発生・検出デバイスの開発を行っています。テラヘルツパルス照射により、スピン状態の超高速制御(右下図)が可能であることを明らかにしています。テラヘルツパルスによりスピンを利用した情報書き込み・読み込み技術をはじめとして、次世代高密度磁気記録デバイスに向けた新規磁気記録方式の提案・実証研究を行っています。



グループHP

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/thz/>

キーワード

テラヘルツ電磁波、センシング、生体材料、テラヘルツスピントロニクス



ワイドギャップ半導体の非接触キャリア特性評価 ～伝導特性の光学的評価～

Noncontact Evaluation of Conductivity properties for ultrawide-bandgap semiconductors
by Terahertz spectroscopy

中嶋 誠 准教授

共同者: V. Agulto特任助教、岩本敏志招へい教授、加藤康作特任研究員

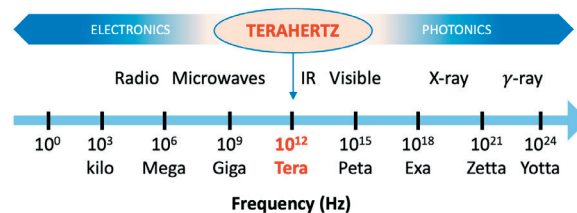
テラヘルツ波による伝導特性評価

テラヘルツ波は波長(周波数)にして、3 mm (0.1 THz)から 30 μm (10 THz) におよぶ電磁波です。この領域では自由キャリアの応答が現れるため、この成分を検出することにより、従来ので電気伝導特性計測とは異なり、電極不要で、非接触非破壊により、伝導特性を取得することが可能です。

現在半導体の伝導特性評価は、ホール測定やCV法によって行われていますが、これらの測定では電極の作製が必須になります。またHg電極の利用は水俣条約により、今後利用が困難になります。このような従来の手法と比べ、テラヘルツ波を用いることで、非接触で高い空間分解能での伝導特性の測定が可能になります。ワイドギャップ半導体として期待されているSiC, GaN, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 等の試料においても確かな測定実績を持っています。

プレスリリース記事参照

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210126_3



Hall method	Capacitance-Voltage (CV) measurement	THz spectroscopy
Uses electrical contacts	Uses mercury (Hg) probe; Hg is toxic when handled incorrectly	All-optical method
Electrode deposition is time-consuming	No electrode deposition needed but probe is in contact with the sample	Noncontact; no electrode deposition needed; high throughput
Destructive method	Nondestructive	Nondestructive

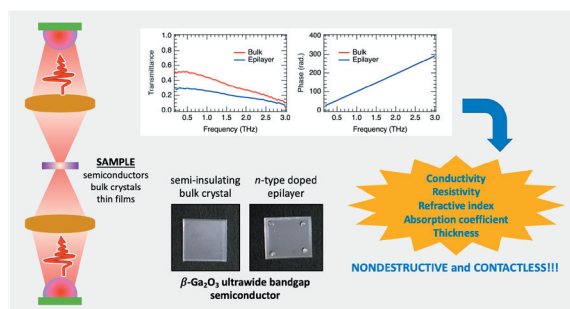
応用1

薄膜試料評価・バルク材料評価 キャリア密度・移動度・厚み

ワイドギャップ半導体は、パワーデバイスや高周波デバイスとして高い性能を示し、注目を集めている。半導体材料の評価として、キャリア密度や移動度等の伝導特性の評価は非常に重要である。

テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)は、新しい優れた手法であり、非接触・非破壊にて、テラヘルツ帯の屈折率・誘電率をはじめ、キャリア密度等の伝導特性を評価することが可能である。

下図は、エピタキシャル膜の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を評価したときのデータである。SiCやGaN等の評価も可能。



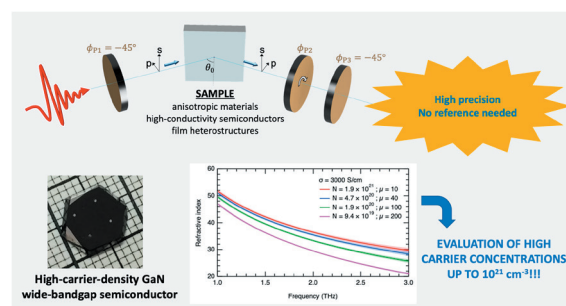
応用2

テラヘルツエリプソメトリによる 高キャリア濃度試料の評価

テラヘルツエリプソメトリは、入射するテラヘルツ波の偏光変化を解析することで、参照測定なしで、キャリア密度等の伝導特性を得ることが可能です。特定のポイントでの情報のみならず、空間分布測定などにも応用可能です。ワイドギャップ半導体GaNにおいては、 $10^{15}\text{--}10^{21}\text{ cm}^{-3}$ の広い領域でのキャリア密度の評価が可能です。

プレスリリース記事 参照

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210915_2



可視光レーザー照射応用

Visible laser irradiation application

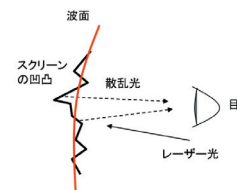
山本和久 特任教授

共同者: 石野正人特任教授、藤 寛特任教授、眞鍋由雄特任教授、藤岡加奈准教授、筑本知子教授

可視光半導体レーザー照射技術

可視光半導体レーザー応用は光ディスクが代表的な市場であったが、このところディスプレイ・照明分野への応用が巨大市場として大きく期待されている(右図参照)。照明や画像表示に対して障害となる、レーザー特有のスペckルノイズの制御、また応用に対する多種の課題解決を図っている。

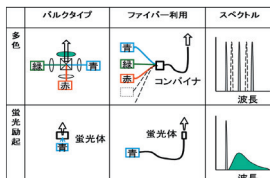
スペckルに関しては、低減を行う技術だけでなく、状態を可変し自由にコントロールをする技術を開発している。



	ユースケース① 走査型レーザー投射	ユースケース② 高輝度表示装置	ユースケース③ レーザー照明 (応用)
内容	レーザー光の走査による投射映像表示	レーザーの高輝度性を活かした大画面映像化	必要部分のみ投射可能な照明、その応用
特長 (優位性)	・高効率(省エネ) ・焦点深度 ・小型	・高効率(省エネ) ・高輝度 ・色再現性大	・高効率(省エネ) ・高輝度 ・デザイン性
代表 応用例	メガネ型MR ヘッドアップ ディスプレイ	レーザーTV プロジェクタ	業務用照明 レーザー ヘッドライト
その他 応用商品	スマホからの 投射 ポケットパソコン 携帯プロジェクタ	デジタルシネマ プロジェクション マッピング スーパー ハイビジョンTV デジタル サイネージ	レーザー照明 (ライティング) スポット照明 (映像投射可能) レーザーイルミ ネーション レーザー 植物工場
ねらい	TV・モニター不要へ	巨大化でも消費電力低減	必要なところのみ照らす

応用1 レーザーによる高輝度照明

レーザー照明には青色半導体レーザーで蛍光励起を行う方法、および蛍光を用いず多色レーザーで行う方法がある。どちらにも取り組んでおり、千ルーメン以上の高輝度白色光発生、低電力化を目指した遠方投射に成功している。



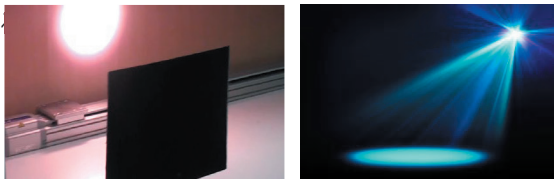
応用2 高画質レーザーディスプレイ

レーザー走査方式の携帯プロジェクタはLEDプロジェクタに比べ光利用効率が高い上に、光源を常時最大値で点灯する必要がなく低消費電力である。また、通常プロジェクタで必要な投射レンズが不要であり超小型化が容易であることも大きな特徴である。



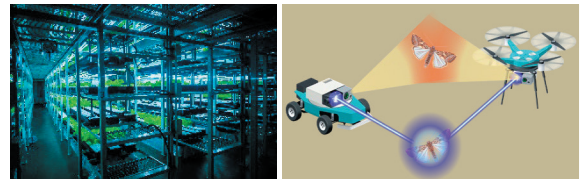
応用3 位置可変走査型レーザー照明

光走査型照明は、センサー連動で時間だけでなく場所的に明るさや色彩が可変できる照明である。必要な箇所のみ照射できるので超省エネであり、その高輝度・点光源性により、超小型レンズを用い損失なく集光・平行・発散ビームが自在に得られ



応用4 レーザーを用いたスマート農業

レーザー走査応用として、画像認識と走査型照射を組み合わせ、植物が存在する部分や成長させたい部分のみ照射することで省電力化が図れる。また害虫に対してレーザー照射を行う、雑草除去に応用するなど無農薬農業が実現できる。



グループHP <https://prcra.vlda-cons.org/>

キーワード 可視光レーザー、レーザー照射、照明、ディスプレイ、スマート農業



スペックル制御技術

Speckle control technology

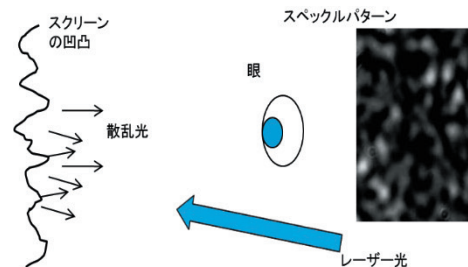
山本和久 特任教授

共同者: 石野正人特任教授、真鍋由雄特任教授、筑本知子教授

スペックル制御

画像表示に対して大きな障害となるのがレーザー特有のスペックルノイズである。右図に示すように、コヒーレントなレーザー光がスクリーンの微小な凹凸の干渉によって斑点状の画像雑音を生じ、その大きさはスペックルコントラストCs(標準偏差/輝度空間平均値)で表される。スペックルノイズを低減するためにレーザー光源のスペクトル、光学系、スクリーンのそれぞれで対策が試みられている。

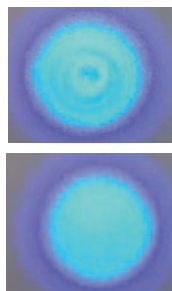
表にスペックルノイズ低減の主要な方式を示す。レーザー光源に対しては波長スペクトル幅を広げる、または複数の異なる波長の光源を組み合わせることで多重化するという方法がある。半導体レーザーはもともと波長にばらつきがあるので、複数個用いることで効果が生じる。光学系での工夫としては、レーザー光源からのビームを時間毎に角度を変化させて出射させることが有効である。具体的な構成として、回転レンズアレイ光学系や拡散板揺動等の方法がある。またレーザーの偏光を直交する2つの偏光に分離しスクリーン上に到達させるという方法もある。一方、スクリーンを振動させることが簡便で効果が高いが、少し大がかりな振動機構が必要である。許容範囲(低減目標Csは4~10%。応用により異なる)以内にするために上述した各種方法を組み合わせる。



対策箇所	構成、方法
レーザー光源	多重化 複数の波長の異なるレーザーを使用。
	広幅化 波長スペクトルを拡大
光学系	角度多重 拡散板や位相板を振動(回転)
	偏光多重 偏光を水平、垂直に分離
スクリーン	振動 スクリーンを振動(回転)
	多層化 進行方向に散乱元を多層化する

応用1 レーザーディスプレイ画質改善

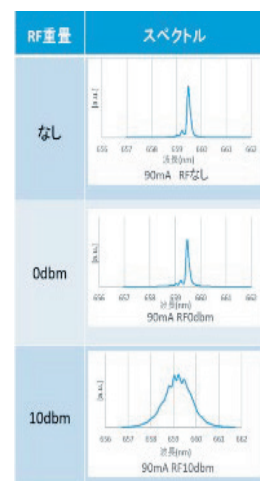
レーザーディスプレイにおいて、スペックルは解像度が悪くなったように見える。またレーザー照明においては、壁などに映るもやもやで気分が悪くなったりする。2次元画像デバイスのバックライトとしてレーザーを照射する方式ではレーザー光を拡散させるなどで比較的容易にスペックル低減が可能である。一方、レーザー走査方式のプロジェクトの場合はビームそのままを扱うので、低減手段が限られる。スペクトル拡大が有効であり、いくつかの方法を検証している。



スペックル大(上)
低減後(下)

応用2 誘目性・視認性による注意喚起

スペックルは映像表示においては弊害であるが、注意喚起照射などで有効利用ができる。ギラギラ感などはレーザーポインターでも実体験できるように人間の注意を引き付ける。特に自然光や室内照明がある状況においてスペックルコントラストの大きなレーザー照射は注意喚起に有効である。またレーザーのスペクトルの狭さは色純度が高く視認性を高めることができ、スペックルとの相乗効果を発揮できる。



半導体レーザーへの高周波重畳による発振スペクトル可変によるスペックル制御

グループHP <https://prcra.vlda-cons.org/>

キーワード レーザー、スペックル、画質、レーザーディスプレイ



走査型可視光レーザーシステム

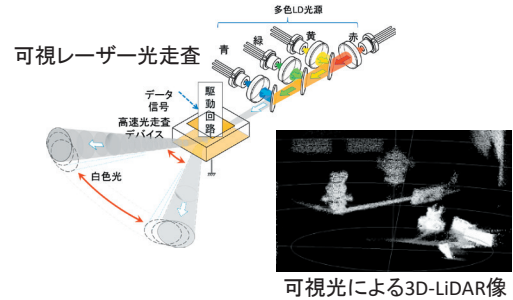
Scanning-type visible laser systems

石野正人 特任教授

共同者：山本和久特任教授、錦野将元上席研究員(量研機構)、村田博司教授(三重大学)、筑本知子教授

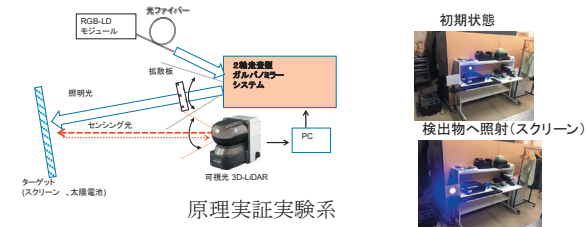
可視レーザー光走査技術

・レーザーの重要な特徴は、ビームを走査することにより望む位置に線状照射や面状照射を行うことができることであり、さらにレーザーを可視光とすることで、投影表示やスポット照明を所望の時・場所・サイズで照射できる点である。また走査反射光の遅延時間検知(TOF)により可視光LiDARを構成することができ、周囲の人・モノの位置や色のセンシングを行うことができ、超小型センサー付き光源として期待できる。



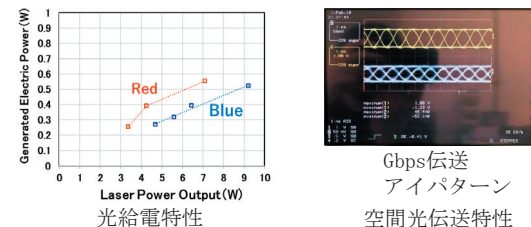
応用1 追従型照明

可視光半導体レーザー走査技術は追捕型照明に応用できる。我々は可視光LiDARと走査型照明の組み合わせで一体構成追従型照明の原理検証を行い、超小型センサー機能集積追捕型照明の可能性を実証した。



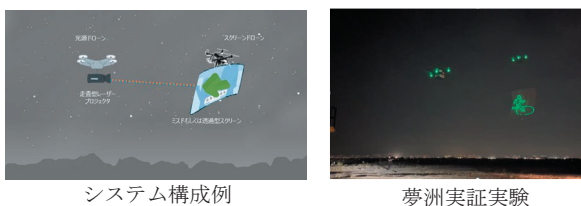
応用2 ワイヤレス光給電・情報伝送

可視光半導体レーザー走査による空間光伝送技術により、照明と同じ光を用いて、所望の位置の機器にワイヤレスでの光給電や秘匿性の高い情報伝送を行える。LEDやマイクロ波と異なりレーザーの高い指向製により、離れた場所へも効率よく伝達できるのが特長である。



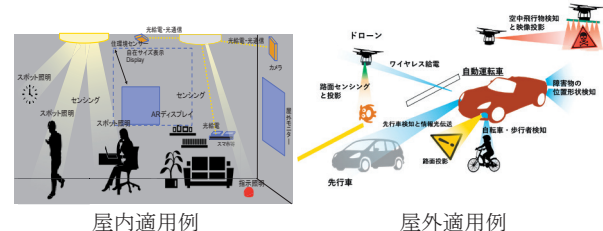
応用3 レーザー空中サインシステム

レーザーとドローンを組み合わせることで空中の望むべき位置に映像や画像を投影することができる。特に投影にフォーカスフリーの走査型レーザープロジェクタを用いることで、自由な距離で鮮明な像を得ることができる。EXPO2025の会場予定地の夢洲で実際に大空への空中投影に成功した。



応用4 IoT照明ステーション

「IoT照明ステーション」は、必要な場所、必要な時間に、望むべき色や強度の可視光を提供できるのが特長である。同一可視光レーザーと走査デバイスの共通化により、センシングと照明・表示・通信・給電や指示の多目的・多機能の一体化集積システムを、超小型・超低コストで実現できる。



グループHP
キーワード

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/mat/>
可視光レーザー、光スキャナ、レーザー照明、IoT照明ステーション
レーザー空中サインシステム



高演色・高色再現レーザー照明

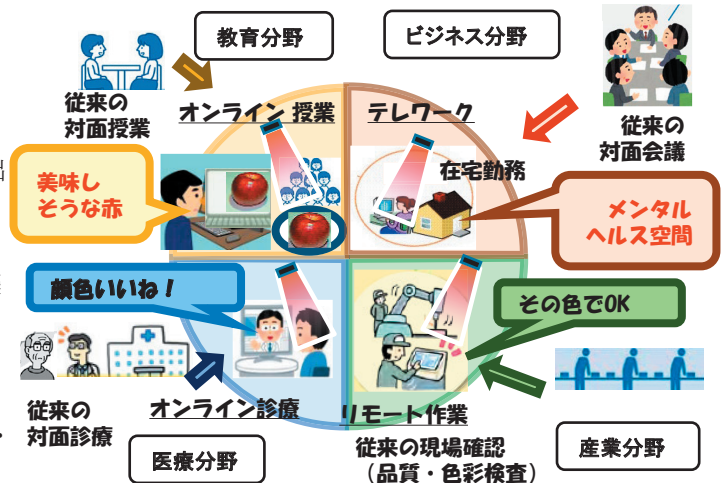
High Color Rendering Index, High Color Fidelity Laser Lighting System

眞鍋由雄 特任教授

共同者：筑本知子教授、山本和久特任教授

オンラインでも同じ色で色鮮やかなレーザー照明

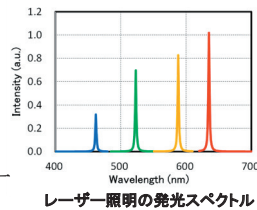
従来の高効率光源であるLEDに比べて、原理的に色温度を一定に保てるレーザー照明はその優れた特長により、リモート社会において遠隔距離通信でオンライン状況(在宅勤務、オンライン授業、オンライン診療、リモート作業)下で同じ色、色鮮やかな空間を演出できるので、LED照明との差別化が図れる。我々は、発光材料である活性層の半導体の混晶揺らぎがなく、レーザー単色性の特長を活かしたリモート社会を構築することを目指す。在宅勤務(演色性の高い照明空間で癒しを感じる)、オンライン授業(同じ色と高色彩での授業)、遠隔作業(同じ色で検証確認できる現場)、オンライン医療(同じ顔色で診察できる)となる高演色・高色再現を可能にしたレーザー照明装置の開発を企業と共同研究を通じて、リモート社会に貢献している。



リモート社会において構築されたレーザー照明社会

応用1 高演色高効率レーザー照明

レーザー照明の構成として様々な種類のレーザーや蛍光体などの光学系が提案されているが、ここでは青色、緑色、赤色のRGB系レーザーに黄色レーザーを加えた4元系の構成で、光源波長や光強度を演色性が最大となる組合せを、加法混色法の計算方法で求めた。3000から6500 Kの色温度範囲において、平均演色評価数(R_a)と、赤色の演色評価数(R_9)の演色性を80以上の照明装置を可能にした。上図は色温度5000 Kの4元系レーザーの構成における発光スペクトルを示す。



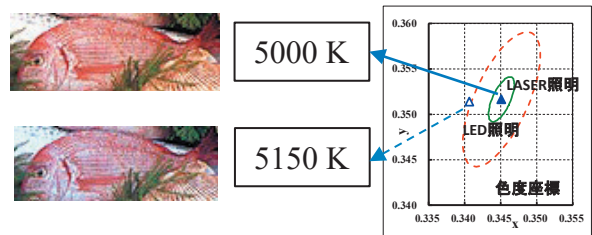
演色性は $R_a=85$ 、 $R_9=83$ の高演色照明である。下図は、レーザー照明とLED照明下でリンゴを撮影した。レーザー照明は $R_a=87.3$ 、 $R_9=95.9$ と高演色であった。

	レーザー照明	LED照明
りんご		
R_a	87.3	82.2
R_9	95.9	8.7

レーザー照明とLED照明の比較

応用2 高色再現レーザー照明

リモート社会において、遠隔地間で同じ色の対象物を見るためには、色再現精度の高い照明で見る必要がある。我々は、励起源(青色レーザーや青色LED)で黄色蛍光体を使って白色光を作成し、色再現できる照明装置を研究した。励起源を青色レーザーと青色LEDとし、色温度5000 K白色光源を作成した。これらの光源で鯛を撮影した結果、レーザー照明(左上図)とLED照明(左下図)とでは、明らかに色の違いがわかる。この結果を色度座標(右図)で表現すると、レーザー照明(図中心▲)で、LED照明(左の位置△)となる。LED照明の発光部の半導体活性層は混晶半導体であり、混晶揺らぎの為に、LED照明の色温度は、最大5150 Kまで色ずれが発生するが、レーザー照明下ではほとんど色ずれは生じず、実際の色とほぼ同じ色を見ることが出来る。



レーザー超音波(音波)技術

Laser ultrasonics (sonics) techniques

染川智弘 招へい教授(レーザー技術総合研究所)

共同者: 倉橋慎理共同研究員(レーザー技術総合研究所)

レーザーによるインフラ構造物の検査

高度成長期に建設された構造物の老朽化が大きな社会問題となっており、構造物の健全性を効率よく診断できる技術の開発が急務である。

健全性の評価には打音検査法が主に用いられているが、当研究グループでは打音検査法に代わるレーザーを用いた検査方法の研究を進めている。

衝撃波励起用レーザーをコンクリート表面に照射して、表面を微小振動させる。その微小振動を検出用レーザー検出する。微小振動は健全部と欠陥部で振動モードが変化するので、このモードを解析することで欠陥を検出する。

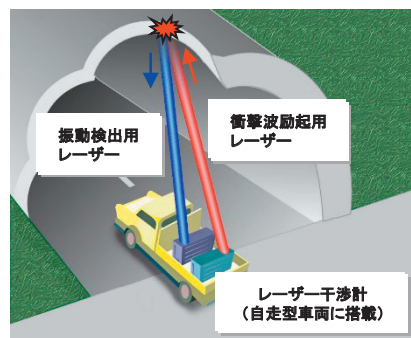


図. レーザーを用いたインフラ構造物の検査技術の原理

応用1 レーザーによるトンネル覆工コンクリート検査技術

山陽新幹線トンネル覆工コンクリートに、この技術を適用してコンクリート剥離等の欠陥検査の検証を行った。この技術は欠陥を検出するための十分な性能を有することを確認した。



図. レーザー検査法

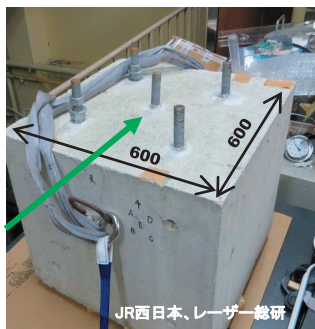
応用2 レーザーによる鋼板接着床版の浮き検査技術

この技術を使用して、高架橋の鋼板接着床版における鋼板とコンクリートとの剥離の検査を行った。その結果、十分な性能を有することを確認した。



図. 装置からレーザーを照射して鋼板の浮きを検査

応用3 レーザーによるケミカルアンカーの欠陥検査技術



コンクリート付帯のケミカルアンカーボルトの欠陥検査にレーザーを適用する可能性を見出した。この技術はトンネル内のさげづかや照明器具、配管などを固定するための一手法として期待できる。

図. ケミカルアンカーボルトのコンクリート供試体

応用4 レーザーによるひび割れ深さ計測

衝撃波励起用レーザーを照射して超音波をコンクリート内部に発生させて、超音波がひび割れを迂回して戻ってくる時間を計測することでひび割れ深さを評価する方法である。ひび割れ深さ100 mmまでの計測が可能である。

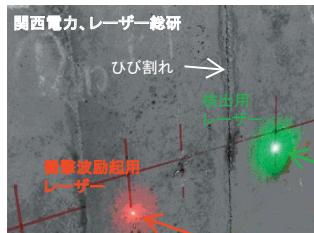


図. レーザーを用いたひび割れ深さ計測

グループHP <https://www.ilt.or.jp/>

キーワード レーザー打音・超音波探傷、非破壊検査



レーザーリモートセンシング技術

Laser remote sensing

染川智弘 招へい教授(レーザー技術総合研究所)

共同者: 藤田雅之招へい教授(レーザー技術総合研究所)

ライダーによる種々の環境計測を実施

ライダーはLight Detection And Ranging(LIDAR)の略語であり、レーザーの光源をラジオ波からレーザーに置き換えたリモートセンシング技術である。レーザーと測定対象の相互作用(ミー散乱、ラマン散乱、吸収等)やレーザーの特性(偏光、ドップラー効果など)を望遠鏡等の集光光学系を利用して観測することで、数kmに及ぶ測定対象の濃度、分布情報を取得することが可能であり、中国からの越境汚染が懸念されている黄砂、温室効果ガスであるCO₂、局所的な豪雨(ゲリラ豪雨)予測に向けた水蒸気の観測など、様々な環境計測へ応用が可能である。

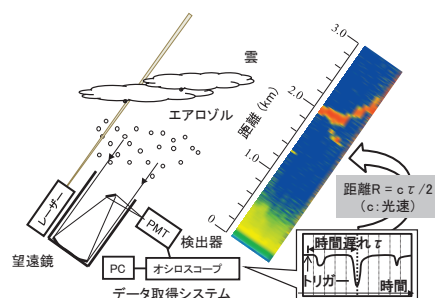


図. ライダーの原理

応用1 白色光ライダー

高強度フェムト秒レーザーをガス中に集光すると、非線形効果によって自己位相変調が誘起され、紫外から赤外におよぶ広帯域なスペクトルをもつ白色光が生成される。この白色光をライダー光源に用いる「白色光ライダー」では、これまで単色のレーザー光が複数台必要であった環境計測が一台の装置で実施可能になる。



図. 白色光ライダー

応用2 赤外ガス吸収計測

赤外域にはCO₂やメタン、COといったガスの吸収ラインが多数存在しており、その吸収波長で発振するレーザーを用いて吸収計測を実施すれば、高精度に対象ガスの濃度評価が可能となる。

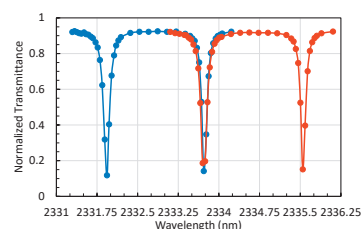


図. DFB レーザーを用いたCOの赤外吸収スペクトル

応用3 海中モニタリング

海底開発では資源探査手法の開発だけでなく、海底開発に伴う海洋生態系・環境への影響評価が必要であるため、広範囲にわたる領域を短時間でモニタリング可能な水中ガスラマンライダーによる海中モニタリング技術を開発している。



図. 石垣島近海における海上ラマンライダー試験の様子

応用4 ラマンライダーと微量成分分析

ラマンライダーでは、大気中の水蒸気の高度分布計測が可能となる。得られたデータを気象予測モデルに同化することによって、予測精度の向上が期待できる。また、ラマン分光法を用いると、水・油に溶存しているガスの微量成分分析も可能である。

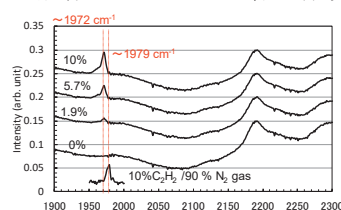


図. 絶縁油溶存アセチレンのラマンスペクトル



パワーレーザーシステム工学グループ、パワーフォニクスグループ フェムト秒レーザーを用いたフラグメント フリーイオン化技術

Fragmentation-free ionization technology using femtosecond lasers

谷口誠治 招へい准教授(レーザー技術総合研究所)

共同者: 中島信昭特別研究員(レーザー技術総合研究所)、ハッ橋知幸教授(大阪公立大学)

フェムト秒レーザーを用いた試料分子の定量評価

ダイオキシン類等の大分子量物質を質量分析計測を行うためには分子をフラグメント化させずに計測することが必要である。試料をイオン化させる方法は、試料の励起準位にレーザー波長を合わせた共鳴多光子イオン化法と、フェムト秒レーザーを用いた非共鳴多光子イオン化法に分けられる。共鳴多光子イオン化法のイオン化効率は励起準位の寿命に左右されるが、波長 $2\mu\text{m}$ 帯フェムト秒レーザーを用いた非共鳴多光子イオン化法ではその欠点がない、また、レーザーパルス幅が短く親イオンがフラグメント化する確率が小さいために、イオン化効率が高く極微量の試料が計測可能である。



図. 波長 $2\mu\text{m}$ 帯フェムト秒レーザー装置

応用1

波長 $2\mu\text{m}$ 帯フェムト秒レーザーによるダイオキシン類計測技術

ダイオキシン類は1980年代から国内で少しずつ広まり、テレビ報道などで取り上げられることにより、知られるようになり、1997-1999年にかけて異様な盛り上がりを見せた。現在では、大きな焼却施設を建設することによりダイオキシン類は減少傾向にあるが、ダイオキシン類は未だに土壌、河川、海水などにまだ多く含まれているのが現状である。

当研究グループは、波長 $2\mu\text{m}$ 帯フェムト秒レーザーを用いた非共鳴多光子イオン化法でダイオキシン類のイオン化を行い、そのイオンをTOF型質量分析器で計測を行った。図はポリ塩化ジベンゾダイオキシンを計測したTOF波形である。フラグメント化を起こさずに計測ができる。

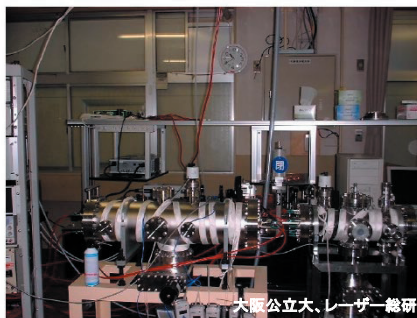


図. 質量分析装置

ポリ塩化ジベンゾダイオキシン

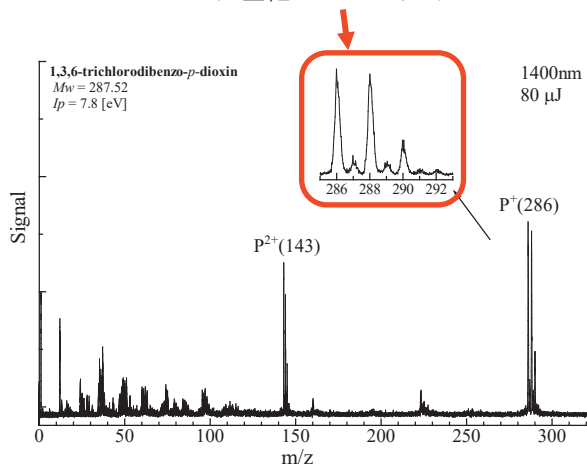


図. ポリ塩化ダイオキシンが検出されたTOF波形

グループHP <https://www.ilt.or.jp/>

キーワード femtosecond laser, TOF-mass spectroscopy, fragmentation-free ionization, dioxins



レーザー中性子源による新しい非破壊検査技術

水素の可視化、元素ごとの温度を透過計測

Non-destructive Inspection by Laser-driven Neutrons

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

X線で見えない水素や元素の情報を瞬間分析

中性子は原子核を構成する、電荷を持たない粒子です。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、深部まで透過できます。加えて、X線では見えない水素、水や有機物などを検出できます。しかし、中性子を得るには原子炉や加速器といった特別な施設が必要でした。

そこで我々は、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。



応用1

橋梁・ビルなどの老朽化検査や 水素機器の開発・信頼性向上技術

レーザー中性子源を使えば、メートルサイズの厚い構造物に進入した水を透かして見るができます。老朽化したインフラの補修の優先順位を非破壊で評価できます。また、X線と中性子のフラッシュを同時に発生できるので、有害物質の評価(図1は充電電池に含まれるカドミウムを検出)や、ステンレス配管中の水の検知に成功(図2)しています。燃料電池や水素エンジン、配管の内部の高圧水素を透過検出することも可能です。レーザー中性子源なら10万分の1秒で計測が完了するので、水素の動きを瞬間的に計測できます。カーボンニュートラル社会実現に不可欠な水素機器の開発・信頼性向上に役立ちます。

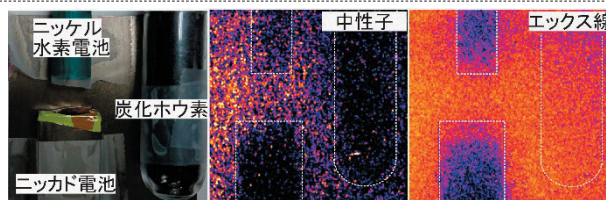


図1:レーザー中性子・X線同時撮像。中性子の透過率からニッカド電池内部のカドミウムの厚さを評価した。

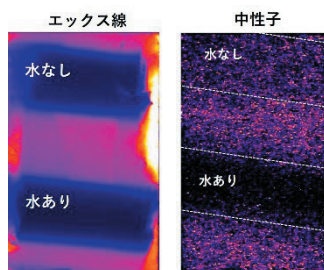
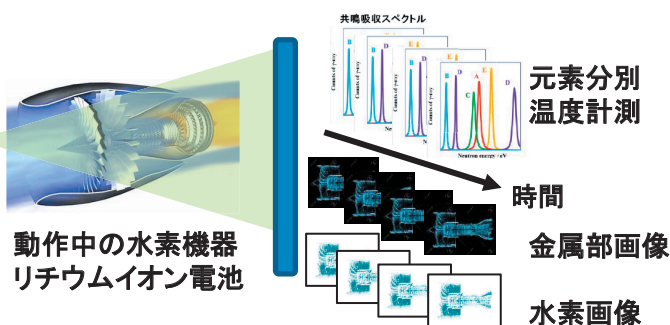


図2:ステンレス配管中の水の透過撮像。X線では配管の影だけが映り水の有無は分からないが、中性子では水のある方が影が濃く映るので判別できる。

応用2

元素を選別して温度を透過・瞬間計測：マルチパラメータ高速分析

中性子の吸収を計測することで、元素を選別してリモートで温度を計測することができます。例えば、リチウムイオン電池の場合、電極材料のみを選別して、温度変化を計測できます。電荷を持たない中性子は電気的影響が極めて少なく、充電・放電中に分析できます。これにより、破損・損傷する瞬間の様子をリアルタイムで計測することも可能になります。温度に加えて、材料ごとに選別した透過画像を同時計測できる、マルチパラメータ高速分析を実現します。



レーザーによる高輝度X線源 及び高速X線分光・イメージング技術

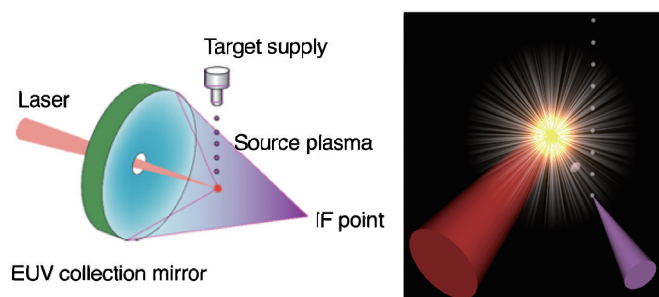
High-brightness X-ray source using lasers and high-speed X-ray spectroscopy and imaging technology

藤岡慎介 教授

西村博明教授(福井工大)、澤田寛准教授(米国ネバダ大学リノ校)、疇地宏名誉教授(大阪大学)
西原功修名誉教授(大阪大学)、砂原淳研究員(米国パデュー大学)、難波慎一 教授(広島大学)

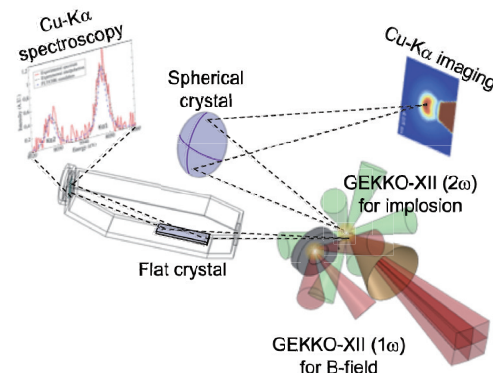
レーザー生成プラズマ高輝度X線源

高強度レーザーによって生成されるプラズマからは、非常に明るいX線が放射されます。その明るさは星の明るさに匹敵するほどです。更に、X線の発光時間は、レーザーパルス幅とほぼ等しいため、極めて短時間だけ発光する「フラッシュX線」としても機能します。明るいX線を使って、レントゲン写真のように物体の瞬間を透視することや、物質を加工すること、更には星の研究をすることが可能になっています。



高速分光・イメージング技術

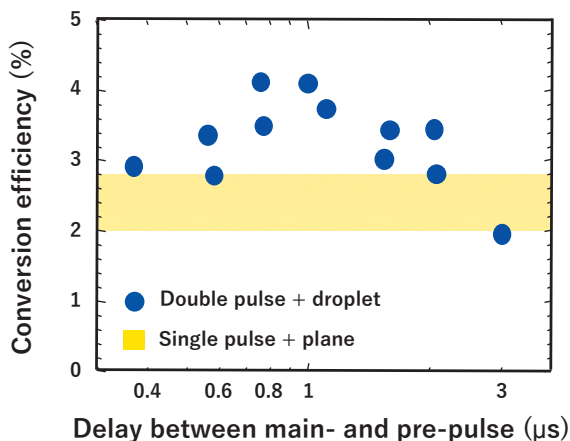
プラズマから放射される光は、プラズマの組成、温度、密度、速度など、様々な情報を運んでいます。プラズマから放出される光のスペクトルを観測すること、及び、プラズマ発光を撮像することは、プラズマを用いた応用研究において不可欠です。我々が有する、高速分光・高速イメージング技術は、様々な応用を支えるプラズマ診断技術として貢献できます。



応用1

次世代半導体デバイス製造用 極端紫外光源

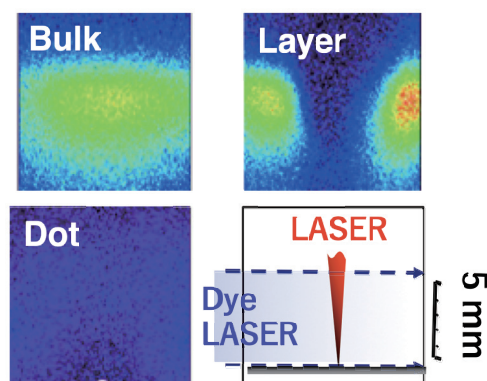
高出力レーザー照射によって、物体がプラズマ化する過程、そのプラズマが光を放出する過程を詳細に調べた結果、非常に効率的な極端紫外光源を作ることになりました。この技術は、次世代の半導体デバイスを製造するための新しい光源として利用されています。



応用2

レーザー誘起蛍光法による、 プラズマ中の中性粒子分布診断

プラズマの中には、少なからず、電離してない中性粒子が混じっています。プラズマを応用する観点では、中性粒子は、プラズマの温度が下げる効果に加えて、装置を汚すゴミにもなります。我々は、レーザー誘起蛍光法を用いることで、光を発しない中性粒子を可視化することに成功し、プラズマ光源の最適化に貢献しました。



グループHP
キーワード

<https://lf-lab.net/>
X線源、極端紫外光、イメージング



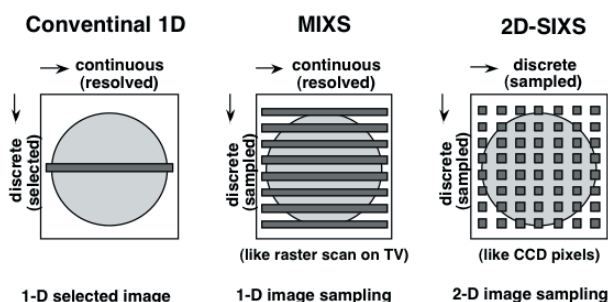
高精度X線画像計測法

High-precision X-ray image measurement technique

藤岡慎介 教授

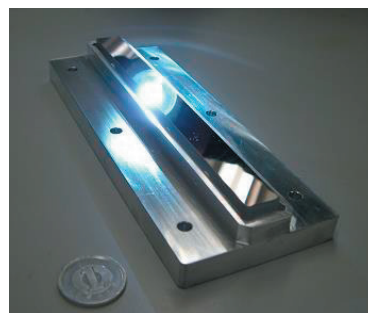
ストリークカメラにおける画像サンプリングの応用

2次元X線画像に対して1次元または2次元画像サンプリング技術を応用すると、本来1次元空間分解画像を時間分解撮影するX線ストリークカメラでも2次元時間分解画像を取得することが出来る。



軟X線全反射鏡

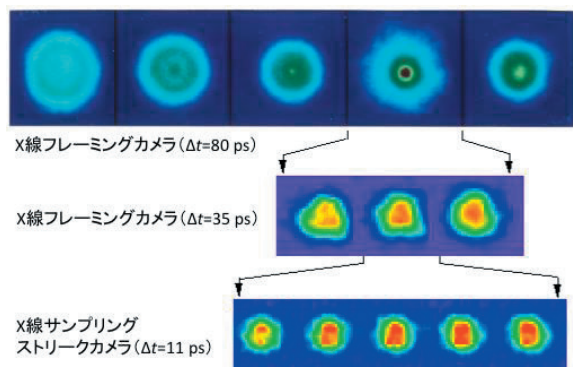
MeV領域の強烈なガンマ線バックグラウンドのある過酷環境においても、全反射X線反射鏡を導入すれば、keV領域の2次元軟X線画像撮影が可能になる。検出器としては時間分解ならX線フレーミングカメラ、時間積分ならイメージングプレートなどが使用出来る。



応用1

超高速X線被写体のフレーミング 2次元画像計測

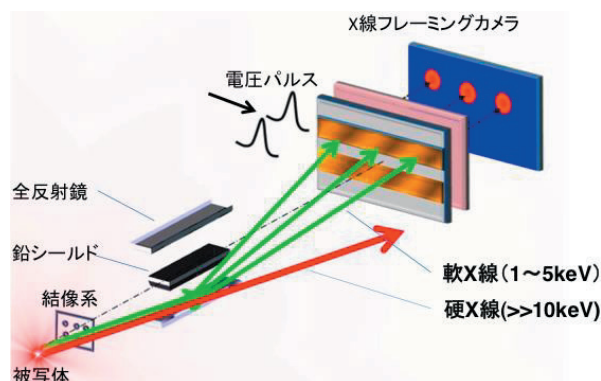
レーザー加熱生成プラズマのような、ピコ秒レベルで高速変化するX線光源の形状や運動を2次元画像として時間分解撮影することが出来る。下記の例はレーザー核融合プラズマの爆縮コアプラズマの時間分解画像。時間分解能は最速で2ピコ秒、フレーム数は最大100コマ程度まで可能である。



応用2

ガンマ線過酷環境下のX線 フレーミング画像計測

X線全反射鏡をX線フレーミングカメラに結合することにより、硬X線・ガンマ線 (> 10 keV ~ MeV) 過酷環境下においても光源の軟X線 (1 ~ 5 keV) のみの時間分解画像を取得出来る。



グループHP <https://lf-lab.net/>

キーワード ストリークカメラ、フレーミングカメラ、X線



ニュークリアフォトニクスグループ アバランシェ光増倍パネルによる モバイル放射線モニター

Mobile radiation monitor by using Avalanche photon intensifier panel

有川安信 准教授
共同者: 余語覚文教授、安部勇輝助教

アバランシェフォトダイオードを用いた 高効率なイメージ増強パネル

放射線計測にかかせないシンチレーション発光を画像として撮影するためには、微弱な光を増倍する装置(イメージインテンシファイア)が必要である。従来のイメージインテンシファイアは高価で開口径にたいして装置が大型であり、高圧電源を必要としたためモバイル化が困難であった。我々はアバランシェフォトダイオードアレイ(MPPCとして市販)を多数ピクセル配列し、各ピクセルごとに発光LEDを結合させたデバイスを開発した(図1、図2)。本装置は量子効率(光を電子に変換する効率)が40%程度、光増倍率として 10^5 と得られ、しかも高速応答である。57V程度の電源で駆動できるため、ボタン電池直列つなぎで動作でき、モバイル化が実現している。表1は従来のイメージインテンシファイアとの性能比較である。この装置は、中性子ラジオグラフのシンチレーター信号増強(1000倍向上)、医療用PET診断装置の超小型化、リアルタイム診断ができるようになる、赤外線や紫外線レーザー光や、微弱光の可視化様フォスファープレートとしてなど応用は多岐にわたる。

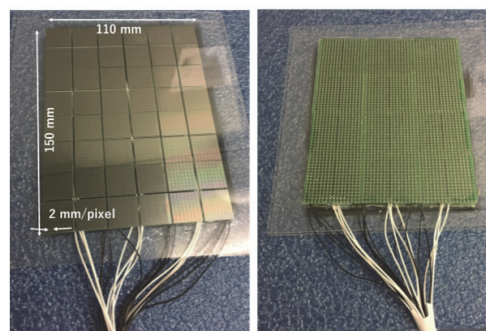


図1 アバランシェ光増倍パネル

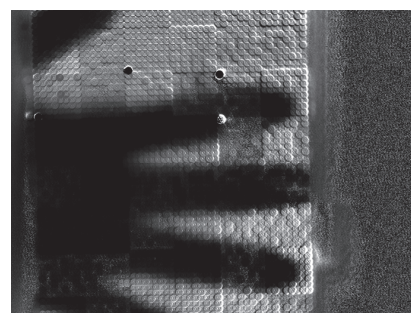


図2 アバランシェ光増倍パネルによる
暗室内の微弱光による手の影

応用1 中性子ラジオグラフの超高感度化

中性子ラジオグラフはこれまでのX線撮影では透視できなかったような分厚いコンクリート内部などの検査が可能になる。中性子はX線に比べ発生が困難であり、さらに検出も困難であることから、測定装置の高感度が必須である。アバランシェ光増倍パネルを中性子シンチレーターアレイに接着することで、シンチレーション信号をおよそ 10^5 倍まで増強し、中性子1個の信号が得られるようになった。図3は密封放射線源からのガンマ線を、シンチレーターアレイとアバランシェパネルで増倍撮影し、CCDカメラで撮影した様子である。1個1個のガンマ線が容易に検出できるようになった

応用2 PET診断のモバイル化

現状の医療用PET装置の放射線計測部は大掛かりな装置である。シンチレーターとアバランシェ光増倍パネルを組み合わせれば、スマホサイズのデバイスでリアルタイムにガンマ線を検出できることから、PET診断のコンパクト化が期待される。

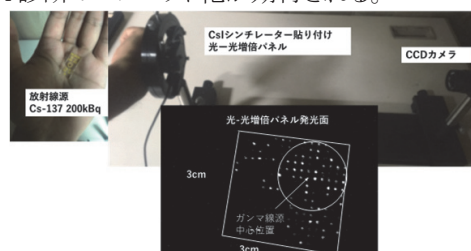


図3 本装置を用いた密封放射線源の観測の様子

グループHP <https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research01/np/>
キーワード 放射線、モバイル放射線診断装置



高速応答有機液体シンチレータ

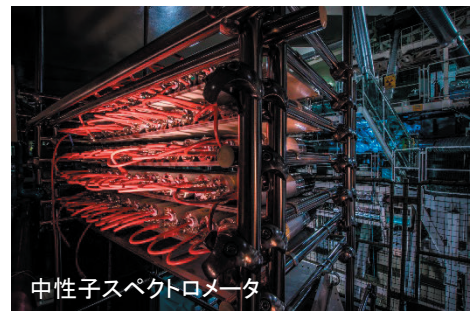
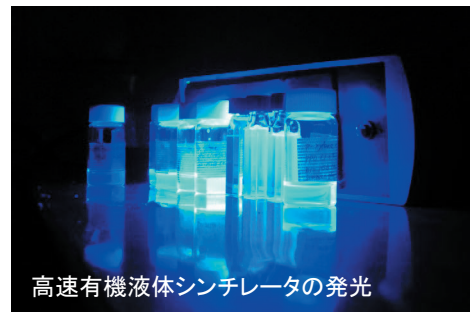
A fast-response organic liquid scintillator

安部勇輝 助教

共同者: 中井光男招へい教授, 有川安信准教授

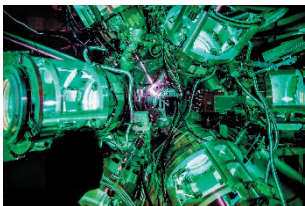
サブナノ秒の発光寿命で中性子の時間分解イメージングを可能にする

シンチレータは α 、 β 、 γ 線等の放射線を紫外光や可視光に変換する物質であり、光電子増倍管やCCDといった光検出器と組み合わせることで医療・工業・高エネルギー粒子科学における様々な放射線検出に用いられる。中でも有機材料をベースとするシンチレータは中性子の検出に不可欠なものであり、Time-of-flight計測用の中性子検出器や中性子ラジオグラフィ用のイメージング素子として重要である。我々は、発光寿命の短い蛍光材料の開発や、酸素等の不純物の添加による発光寿命の短縮に成功し、サブナノ秒の時間応答を持つ高速有機液体シンチレータを開発した。シンチレータの応答が高速になることで、Time-of-flight計測における γ 線と中性子の時間弁別が容易になる他、高精度な中性子スペクトル計測が可能になる。また液体ベースである為、シンチレータの大型化が容易であり、現実的な製造コストで受光面の大きなイメージング素子の設計が可能になる。これにより、X線・中性子ラジオグラフィによる大型構造物の非破壊検査や、高速で運動する物体や流体の可視化が可能になると期待される。

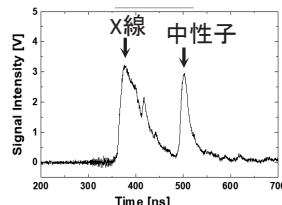


応用1 高時間分解放射線計測によるナノ秒スケールの物理現象の解明

本技術は高エネルギー粒子科学や核科学、核融合工学等の分野における放射線計測への応用が期待される。特に、粒子加速器や高強度レーザーを用いた核反応では、電子やX線、中性子など複数の放射線が同時に生成する為、これらを飛行時間の差から弁別するTime-of-flight計測が重要である。我々の高速液体シンチレータは、これらの放射線計測において高精度な時間弁別を可能にする。特に中性子計測においては、たった数ナノ秒の飛行時間差から中性子のわずかなエネルギーの違いを検知し、高エネルギー粒子やプラズマの状態を解明することができるようになる。

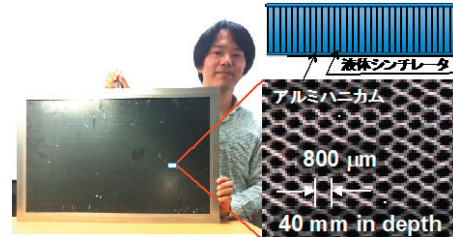


レーザープラズマ実験に於けるTime-of-flight計測



応用2 X線・中性子ラジオグラフィ用の大型・高速イメージング素子

レントゲン検査をはじめ、X線ラジオグラフィは既に医療・工業分野で広く利用されているが、近年は有機材料や流体の観測に適した中性子ラジオグラフィの実用化が期待されており、そのイメージング素子の開発に注目が集まっている。本技術はX線と中性子の双方に検出能力をもつイメージング素子の開発を可能にするものであり、素子の大型化、高速化を容易にする。これにより、土木建造物の劣化試験やエンジンなどの高速運動体内部の観測、金属配管内を流れる流体の可視化などが可能になり、医療・工業・セキュリティ分野をはじめ、様々な分野での応用が期待される。



ハニカム構造のアルミ板を用いた中性子イメージング用の大型液体シンチレータビクセルアレイ

グループHP
キーワード

<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research02/kgp/>
シンチレータ, 量子ビーム計測, 中性子イメージング



極限材料科学グループ 先端イメージング分光

Advanced Imaging Spectroscopy

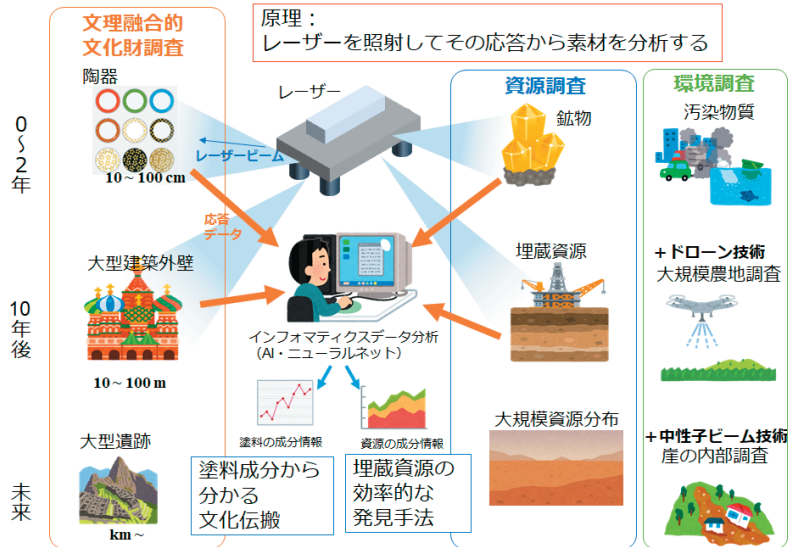
清水俊彦 准教授

共同者：猿倉信彦教授、山ノ井航平准教授

見えないものを見るために

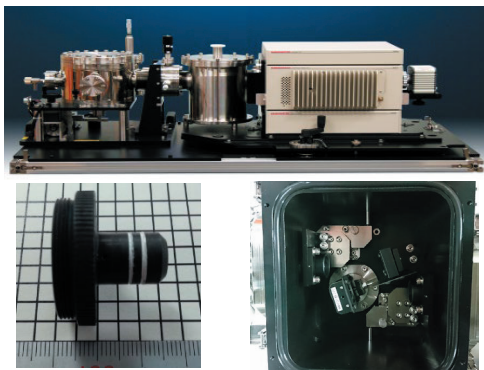
産業技術分野及びエネルギー・環境分野において、広い波長域で二次元的に解析する分光装置が望まれています。特に従来は困難であった中赤外光と深紫外光の領域で需要が高まっています。私たちは、赤外から深紫外光までの広い波長領域に対応するイメージング分光技術の研究を行っています。

可視光以外の領域では、透過率の問題から光学素子とすることができる材料がほとんどありませんでした。そこで、私たちは、可視光以外でも透明な材料や光学素子の研究に加え、それらを使用した分光装置の開発まで行っています。そして、それらの装置を使用し、学際融合的に環境・資源・文化財などの社会問題を解決する目的で分光計測を行っています。



応用1 分光装置開発

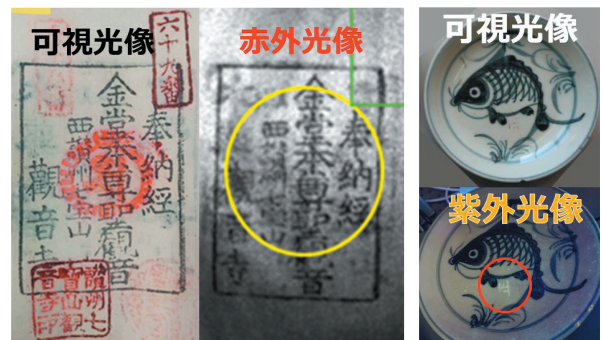
深紫外領域では、対応した光源と計測器が入手が難しいという点があります。本グループでは企業と協力し真空紫外まで対応した分光器・ストリークカメラシステムも開発しました。このため、深紫外光学材料の評価も効率的に行うことができます。さらに、近年のイメージング分光応用のため、フッ化物材料を組み合わせることにより深紫外域の色消しレンズを実現しました。このレンズを使用したイメージング分光器も作成しています。



応用2 文化財の分光

近年学際連携による研究が重視されており、なかでも文理融合は重要な課題となっています。私たちは、開発した装置を使用し、文化財の専門家と協力しながら、レーザー科学を応用した文化財分析を進めています。

可視光だけでは塗料の素材や絵の下に隠された情報の取得が困難であるため、物質固有のデータを取得できる紫外から赤外までのイメージング分光が有効です。可視光以外の光を使用することで、見えなかったものが見えるようになります。



グループHP <https://www.ile.osaka-u.ac.jp/ja/groups/research03/lam/>
キーワード イメージング分光、異分野連携

