

# レーザー用光学素子技術の応用

實野孝久 特任教授

共同者：本越伸二招へい教授(レーザー総研)、三上拓哉(株式会社オカモトオプティクス)

## レーザー光学素子技術の応用

核融合実験用の大型レーザー装置や超短パルスレーザー装置に用いられる光学素子には多くの特殊技術が使用されており、それらの技術はいろいろな産業応用にも役立てることが出来る。今回は超短パルスレーザーの新しい波面補正法と超高精度光学素子のための新しい成膜法について紹介したい。現在多くの超短パルスレーザー装置が世界中で稼働しているが、これらのレーザーではレンズによる像転送が困難なことから、可変形鏡による波面補正が正確に行えないという大きな困難が生じている。このため、集光した場合にパルス波形が乱れるという大きな課題を生じており、改善が望まれている。この目的のため、全く新しい波面補正法が考案されており、今後の応用が期待される。また、これらのレーザーに用いられる光学素子も広帯域・低分散でかつ超大型である必要があり、従来の研磨・成膜法では性能に制限があった。これらの困難を克服するため、全く新しい研磨・成膜法を開発しており、今後の広い分野への応用が期待される。現在ルーマニアのELI-NP研究所と協力して新技術の開拓を進めている。



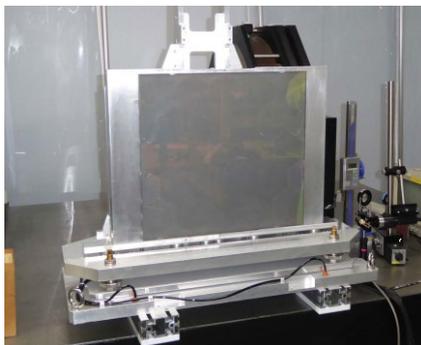
LFEXレーザー装置



ELI-NPレーザー装置

### 応用1 新しい波面補正法

LFEXレーザー装置では波面補正は必須の技術であり、複数の可変形鏡により高度な集光が達成された。しかし超短パルスレーザーでは像転送が無い場合、良好な波面補正が困難であった。そこで新規の像転送方式を用いて波面補正を行うことが計画されている。また、LFEXで実証された複数の可変形鏡による波面補正法の応用により、より高度な波面補正を実現する予定である。



LFEXレーザー用大型可変形鏡 (46 x 42 cm)

### 応用2 超高精度光学素子加工法

約20年前にレーザー研で先駆的な研究を行っていた原子層堆積法が近年長足の進歩を遂げており、レーザー用光学素子に必要な全ての材料を成膜できるようになっていることから、これらを用いて高出力レーザー用の光学素子を製造することを試みている。この方式では成膜を原子層レベルで制御できることから、任意の屈折率を持った薄膜や傾斜屈折率の成膜も可能となり、光学素子の性能を格段に向上することが可能となる。大型化も容易であり、これまで実現できなかった新しい高性能光学素子が実現できると考えられる。

#### 2. SURFACE CHEMICAL REACTIONS

Thin films were achieved by chemical reactions of two different vapors. Reactant vapors are introduced into the chamber. In order to prevent the gas-phase reaction, one vapor was exhausted out from the chamber. Consequently, the reaction  $TiCl_4 + 2H_2O \rightarrow TiO_2 + 4HCl$  was separated into two

原子層堆積法の成膜原理



## 深紫外レーザー用光学結晶の開発

吉村政志 教授

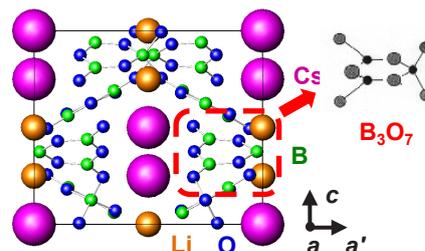
共同者：森勇介教授(工学研究科)

### 研究背景

IoT・AI技術の活用により製造業が変革期を迎えており、加工の自由度が高く、ドライプロセスであるレーザー加工が注目されています。また、航空機や自動車に用いられる炭素繊維複合材(CFRP)、パワー半導体材料のGaNやSiC、セラミックス材、タングステンなどの切削工具材といった難加工性先端材料の加工に向けて、高光子エネルギーの深紫外レーザーの期待が高まっています。

当グループでは、大阪大学で発明された非線形光学結晶CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>(CLBO)の高品質化に成功し、産学連携によって短パルスのピコ秒深紫外レーザー(波長266nm)の開発に取り組んでいます。また、深紫外レーザーの高出力化に対応するため、損傷耐性に優れた窓材やレンズ材として新しい光学硝材候補として、SrB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>(SBO)の開発も進めています。

参考：日本経済新聞オンライン 2021年6月22日



非線形光学結晶CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>

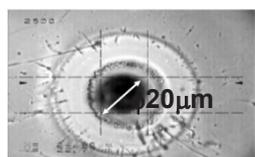
### 応用1 難加工性材のレーザー加工技術

高光子エネルギーの深紫外レーザーパルス(波長266nm)は、加工材料での吸収性が優れているため加工品質に優れ、短波長ゆえに微細加工にも適しています。

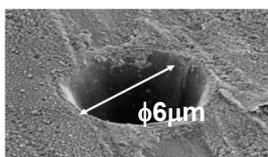
スペクトロニクス(株)・三菱電機(株)との連携により、ピコ秒深紫外レーザー光源、加工機の開発を進めています。



三菱電機社製50W  
266nmレーザー加工機



355nmレーザー(LBO)  
ポロシリケートガラスへのマイクロピア加工(三菱電機資料)



266nmレーザー(CLBO)

### 応用2 半導体ウェハ、マスク検査

深紫外レーザーの高集光性を活かし、半導体フォトマスクの微小欠陥検査や、Siウエハ上のナノ微粒子検出などでCLBOを用いた光源が利用されています。今後のEUVリソグラフィ技術を用いたシングルナノサイズの微細半導体の製造においても、深紫外レーザーによる様々な検査技術が必要とされています。



米国KLA-Tencor社  
Teron 600シリーズ



NuFlare Technology社  
NPI-7000



## メタマテリアル

中嶋 誠 准教授

共同者: V. Agulto 特任研究員、加藤康作特任研究員

### 研究背景

メタマテリアルは波長よりも小さな構造体を利用することで、屈折率や誘電率を自在に制御することができる新しい物質概念です。波長よりも小さな金属構造等を用いることで、負の屈折率をはじめ、無反射の高屈折率媒質など、誘電率・透磁率・屈折率を自在に制御した物質の作製が可能です。

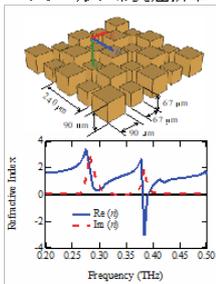


### 応用1 テラヘルツメタマテリアル

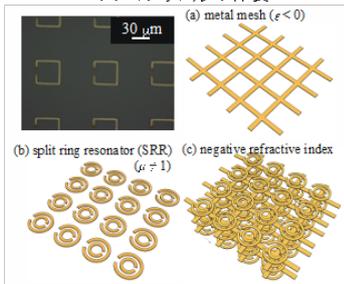
テラヘルツ領域で動作するテラヘルツメタマテリアルをデザイン・作製し、これをテラヘルツ時間領域分光法で測定することにより、透過・反射率や位相遅れ等の評価が可能です。テラヘルツ帯の吸収素子・偏光子の開発を行っています。

スケーリングにより、これらの知見は可視域メタマテリアルの試験モデルとして有効です。

酸化チタン共振器を用いたテラヘルツ帯負屈折率



超微細インクジェット工法によるメタマテリアルの作製

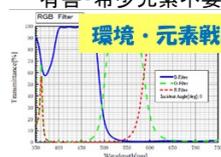


### 応用2 メタマテリアルデバイス

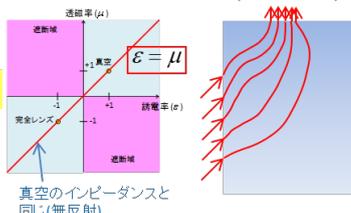
屈折率・誘電率を制御することにより、多くの新しい応用が期待されます。

光学スペクトルの自在な設計

有害・希少元素不要  
環境・元素戦略

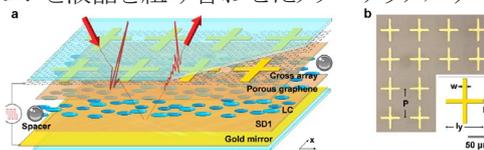


無反射で光を自在に操作(波長、方向)



- ◎ クローキング(透明マント)
- ◎ 完全吸収体による超高効率太陽電池
- ◎ 広角度ビーム操作アンテナ
- ◎ 超解像・近接場顕微鏡
- ◎ 電波障害の防止

グラフェンと液晶を組み合わせたメタマテリアルデバイス



# 新型テラヘルツ波放射光源

中嶋 誠 准教授

共同者: 加藤康作特任研究員、V. Agulto特任研究員、西谷幹彦特任教授

## 新型テラヘルツ電磁波放射光源の開発

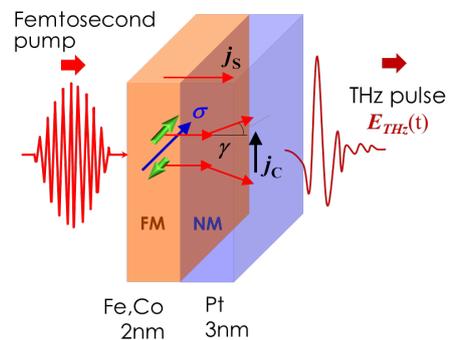
テラヘルツ波を用いたセキュリティシステムは空港のボディスキャナー等にも使われ、また、次世代の通信帯(Beyond 5G, 6G)、の電磁波としてテラヘルツ光源の需要はますます高まっている。

我々は2種類の新規のテラヘルツ光源の開発を実施している。一つは、光励起スピン流を利用した磁性体超薄膜であり、薄さ5 nm ほどの光源から、従来のテラヘルツ光源(ZnTe)と同等の強度を得ることが可能である。右図にその放射モデルの概要図を示す。

また、一方で周期構造を持つ金属板の上を電子バンチが通過するとき、テラヘルツ波が放射される。これはスミス・パーセル放射として知られている。そしてこの金属の周期構造体を誘電体上に形成すると、スミス・パーセル放射とは別に、誘電体中に強いテラヘルツ波が放射されることを見出した。

### わずか 5nm 厚の磁性超薄膜 THz光源

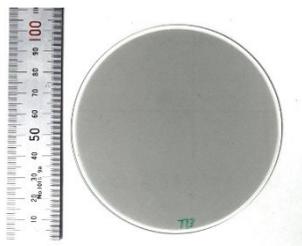
#### スピン流 + 逆スピンホール効果



### 応用1 磁性体超薄膜テラヘルツ波光源

新光源である磁性体超薄膜素子は、高強度、広帯域、微細構造が不要、高いダメージしきい値を有する、作製費用が安価、大口径化可能などの優れた特性を併せ持つ光源である。光励起スピン流をテラヘルツ波に変換する新しい機構に基づいている。

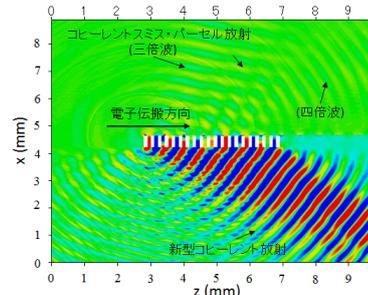
下はテラヘルツイメージングへの応用を意図して作製された直径10 cm の大口径テラヘルツ放射素子である。



ガラス基板上に作製された、直径10cmの Fe/Pt 磁性体超薄膜テラヘルツ放射素子

### 応用2 周期型金属構造による コヒーレントテラヘルツ光源

スミス・パーセル放射は金属周期構造の回折効果による電磁放射であり、周波数が放出角度に依存する広帯域の放射であるのに対し、誘電体中への新型電磁放射は、誘電体の特性による固有電磁モードと電子バンチとの共鳴により励起される電磁放射なので、単一波長で、指向性が良く、従来のスミス・パーセル放射より強度が数百倍大きくなると予測され、高効率高輝度テラヘルツ波光源として期待されている。



誘電体と金属周期構造を組み合わせた新光源 強力なコヒーレントなテラヘルツ波放出の様子



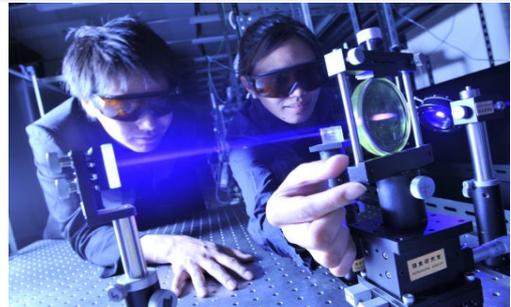
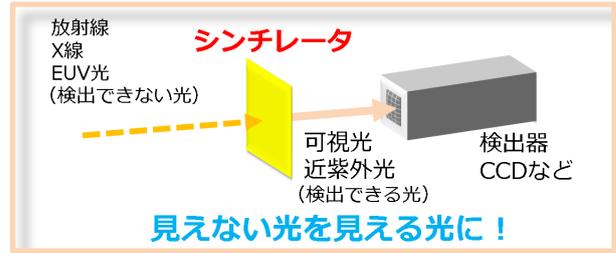
## 次世代量子ビーム用シンチレーター材料

猿倉信彦 教授

共同者: 清水俊彦准教授、山ノ井航平准教授

### 見えない光を見える光に変える

シンチレーターは検出が困難である量子ビーム(電磁波・光・粒子線など)を、検出が容易な領域の光に変換します。本グループでは深紫外光・テラヘルツ光を検出するための「酸化亜鉛シンチレーター」と中性子を検出するための「フッ化物ガラスシンチレーター」の開発を行っています。どちらも企業・他大学と共同した研究の成果であり、現在も改良が続けられています。また、これら以外の材料によるシンチレーターも研究を進めています。それぞれのシンチレーターはデバイスとしての提供が可能で、コンポーネントとしての要望にも対応いたします。実際の用途に合わせた高性能化・カスタム化などへのフィードバックも期待しておりますので、材料・対応する光の領域などにこだわらずご相談ください。深紫外シンチレーターとして開発していた酸化亜鉛が高周波用途に使用できることが最近になり発見できたように新しい用途への拡大も期待しています。



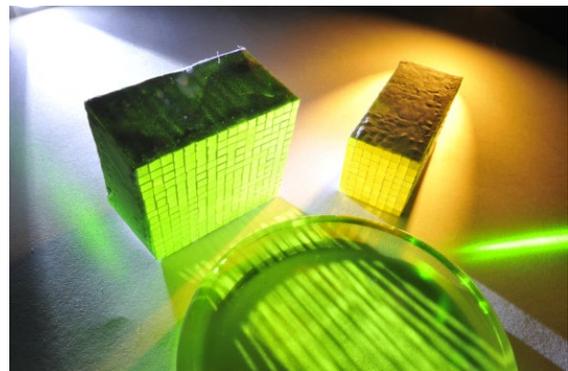
### 応用1 酸化亜鉛シンチレーター

酸化亜鉛シンチレーターは深紫外域まで使用可能で安価で大量生産可能かつ高速応答という特長があります。金属添加などの改良を加えることで従来品よりも大幅な高速化も成功しています。深紫外にとどまらず別の波長域の放射線や高周波光に対しても良いシンチレーター性能を示すことも最近明らかになりました。写真は水熱合成法(共同研究により開発)により育成された大型酸化亜鉛結晶です。



### 応用2 フッ化物ガラスシンチレーター

次世代エネルギーとして期待されるレーザー核融合の実現の為に、爆縮プラズマを診断する為の散乱中性子計測用フッ化物ガラスシンチレーター「 $20\text{Al}(\text{PO}_3)_3\text{-}80\text{LiF}$  (APLF)」を開発しています。APLFにPrを添加することにより、中性子を高効率・高分解能で紫外光に変換できます。現在他の金属の添加や複数の種類の金属の同時添加などによる改良を目指しています。



# レーザー用光学素子への新技術開発

吉田國雄 招へい教授

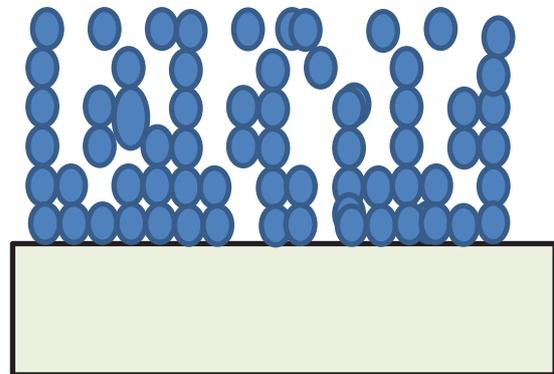
## 光学素子の開発

レーザー装置には反射防止 (AR) 膜、高反射膜、バンドパスフィルターなどの光学素子が蒸着されている。これら光学薄膜では、次に述べる大きな問題点が未解決のままになっている。

- ①光学薄膜を製作する材料は限られており、それらの材料の屈折率の値は離散的である。
- ②低屈折率材料で、最小値を有する材料は $MgF_2$  (1.37) であり、これ以下の材料は存在しない。
- ③光学薄膜を作製する場合は、通常は蒸着用のガラス基板を $200\sim 300^\circ C$ に加熱する。この蒸着の際に光学薄膜には応力が生じ、微細なクラックの発生(引っ張り応力)、或いは基板からの光学薄膜の剥離(圧縮応力)などの問題が生じやすくなる。層数が20層以上となる多層膜、或いは膜厚が厚い赤外域の多層光学薄膜では大きな問題となっている。

本技術は、光学薄膜関連の技術者や研究者にとって夢であった (i) 薄膜の屈折率を自由に変えられる、(ii) 蒸着によって生じる応力を大幅に低くできるポーラス膜(多孔性薄膜)を作成する新しい成膜技術を開発している。

短波長領域で用いられるミラーの表面は、散乱損失を少なくするためにsub-nmの表面粗さが要求される。このような表面は、ワークと砥粒との接触法によってきまるので、従来とは全く異なる手法でsub-nmの表面を創生する技術開発をしている。



多孔性光学薄膜

### 応用1

### 光学薄膜 (AMTF:MgF2)

フッ化物材料の $MgF_2$ とプラスチックとを同時に蒸着してフッ化物とプラスチックの混合体であるAMTF:MgF2 (Adaptively mixed thin film:MgF2) を製作した結果、非常に低屈折率で、低応力の光学薄膜を世界ではじめて実現した。

### MgF2のポーラス化

| 薄膜の種類       | 屈折率   | 散乱 (ppm) | 膜厚 (nm) |
|-------------|-------|----------|---------|
| MgF2        | 1.355 | 98.6     | 116     |
| AMTF:MgF2-① | 1.32  | 226.6    | 104     |
| AMTF:MgF2-② | 1.3   | 249      | 135     |

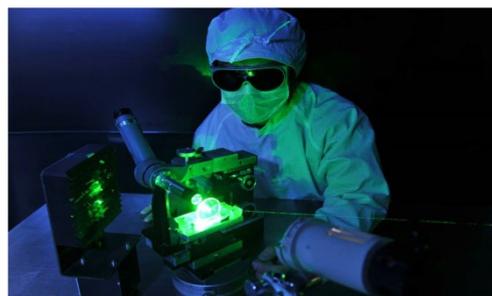


# レーザー損傷耐性評価

本越伸二 招へい教授(レーザー技術総合研究所)  
共同者: 藤岡加奈准教授、吉村政志教授、實野孝久特任教授

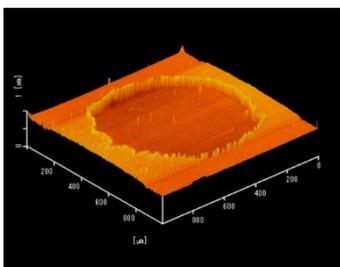
## 光学素子のレーザー損傷

レーザー装置には多くの光学素子が使用されている。光学素子は高出力レーザー光に曝されることにより、物理損傷を生じる。この損傷は「レーザー(誘起)損傷」と呼ばれ、レーザー装置のエネルギーを制限する大きな要因となっている。そのため、レーザー損傷の物理過程を理解するとともに、高耐力を持つ光学素子を開発することは、高出力レーザー装置にとって重要な課題である。



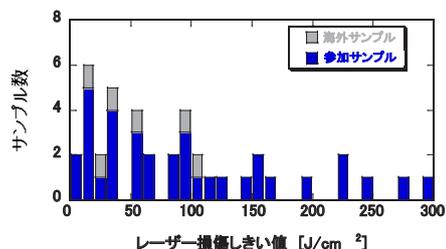
### 応用1 レーザー損傷評価試験

大型レーザー装置の光学素子をはじめ、国内企業からの依頼に対応し、光学素子のレーザー損傷耐力の評価試験を実施している。



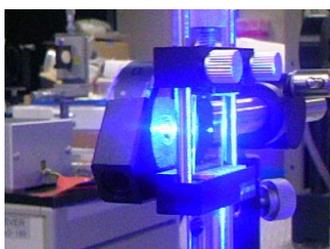
### 応用2 レーザー損傷しきい値のデータベース化

光学素子の開発や使用する上で指針となるように、国内光学素子メーカーと協力して、レーザー損傷しきい値のデータベースの構築を進めている。



### 応用3 劣化・発光測定

レーザー損傷以外にも、光学素子の屈折率や透過特性の変化は、装置性能を制限する要因になる。そのため、材料の劣化や発光の評価を行っている。



### 応用4 保護具の耐光性試験

レーザー光の高出力化に伴い、作業従事者の安全性確保も重要な課題である。保護メガネ、遮光板、保護カーテン、暗幕など、各種レーザー波長に対する耐光性試験を行っている。



## レーザー励起蛍光体デバイス

藤 寛 特任教授

共同者: 藤岡加奈准教授、峯本尚特任研究員、東川雅弘特任研究員、石野正人特任教授、山本和久教授

### レーザー励起高耐性蛍光体とその評価

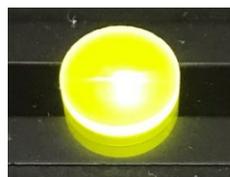
レーザー光を蛍光体に照射するレーザー照明は、省エネルギー、高輝度、遠方照射、色や波長の選択性などの特徴を持つ。特に遠方照射を目的として、高出力のレーザー技術、高い励起光エネルギーに耐える蛍光体とその評価方法を研究する。

高出力のレーザー光や高温環境下で高い発光効率を維持すると同時に、照明としての高い演色性を得る蛍光体材料技術およびデバイス構造技術を開発し、照明システムへの適用を想定した評価技術を確立する。そのため材料の合成、焼成、水熱法を用いた蛍光体の作製を行い、その蛍光体への高出力レーザーの照射手法、蛍光の効率、励起光を含めた色度、および蛍光体の温度調節による高温耐性の評価を行う。実用化に向けた材料やデバイス構造の仕様と評価指標も、応用システムに合わせて設計する。

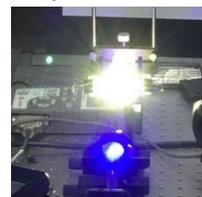
具体的にはCe:YAGなどの黄色蛍光体と、高熱伝導率を有するAlNのコンポジットセラミック蛍光体の作成に成功し、ハイパワー半導体レーザーによる高励起に対して優れた発光特性が得られた。今後は低色温度化と演色性の向上を図り、遠方照明だけでなく家庭、オフィス、医療、道路などで幅広く使用される次世代照明を目指す。

### 応用1 コンポジットセラミック蛍光体

AlN-Ce:YAGからなる酸化物/非酸化物コンポジットセラミック蛍光体(複合蛍光体)の開発に成功した。熱伝導率の著しい向上が見込まれ、ハイパワー半導体レーザーと組み合わせて、高い発光特性を持つ照明デバイスの実用化が期待される。



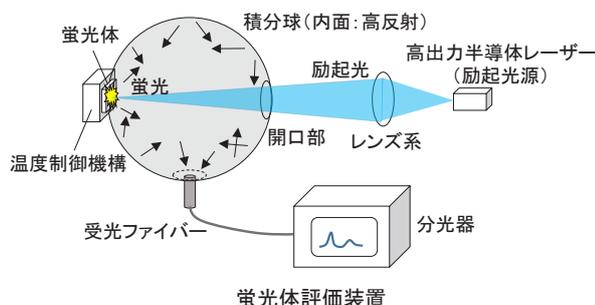
コンポジットセラミック蛍光体



高出力青色レーザー光による発光

### 応用2 レーザー耐性評価

蛍光体材料、デバイスおよび評価装置は、高出力レーザー励起時に光エネルギーや熱エネルギーの負担が増大する。またデバイスの動作温度が上がると発光効率の低下を招く。そこで、積分球と温度制御機構を備えた、高出力レーザー光にも耐える蛍光体評価装置を開発し、材料およびデバイスの基礎的な特性の評価を行う。



### 応用3 遠方投射白色照明

遠方照明の応用には、車載用ヘッドランプ、サッカーや野球のスタジアム照明、劇場や展示場の高天井照明およびスポットライトなどがある。これらは従来ハロゲンランプ、メタルハライドランプや高圧ナトリウムランプなどが使われ、最近ではLED照明が普及しつつある。一方、レーザー照明は遠方投射白色光源としてこれらを上回る性能を備えている。その特徴をさらに伸ばすため、高耐性の蛍光体およびデバイスの研究を行う。



ヘッドランプ



スタジアム照明



スポットライト

