

防衛装備庁技術シンポジウム

レーザー推進による衛星の運動制御の ための宇宙用レーザーの開発

国立研究開発法人理化学研究所
光量子工学センター 光量子制御技術開発チーム

チームディレクター 和田智之

2025年11月11日

光量子制御技術開発チーム

光量子

コヒーレントライマン α 共鳴放射: 物質創成の探求

陽子偏極励起用 589 nm レーザー

画期的な元素粒子プローブの実現に向けて
コヒーレントなライマン α 共鳴電離源を発達させ、ミオナを超速化し、標準模型を超える物理的現象を検討、新しい超低速ミュオン顕微鏡の実現を目指す。

ターゲットとなるパンタセシ分子の光電離に最も適した波長500 nm近傍において、高平均功率、比較的長いバルス幅と低いピークパワーを持つパルスレーザーの開発を行っている。

宇宙

EUSOプロジェクト

人工衛星、探査機、宇宙ステーションなど、真夜かつ夜の環境変化が激しい宇宙空間で、環境計測や距離計測などに利用する高性能レーザーシステムの開発を行っている。

レーザーを使った雲の計測

EUSO 望遠鏡
IR camera
Lidar

環境

ナトリウムライダー

中赤外電子波長可変レーザーを用いた化学剤の遠隔検出

中赤外電子波長可変レーザーによる地球と宇宙の界面に生じる太陽起因のダイナミクスを解明する。

Sodium LiDAR 589:1583 nm (Sodium D₂)

69°40' 58"N, 18°56' 34"E
Tromsø, Norway

中赤外波長可変レーザーを用いた極微量ガス成分計測

中赤外波長可変レーザー
マルチパスセル
自動車排気ガス、大気、火山活動などの環境負荷ガス計測
災害時に瓦礫に埋もれた生存者を迅速に発見する呼吸ガス成分計測
低ミクロンエンジン着火時の燃焼ガスモニタリング
半導体プロセスの濃度制御、クリーンルームモニタリング

基幹要素

材料科学

- 材料育成法の探求
フローティングゾーン結晶育成法
フローティングゾーン法 従来法
るつぼを必要としない
育成雰囲気に制限がない
材料が不純物として混入
結晶の不均質性
- Furnace for the FZ Method
- 新しいレーザー媒質・非線形光学結晶
- 新材料の光学特性の評価

光制御

- 光源基本要素
固体レーザー
フリーバーレーザー
半導体レーザー
非線形光波数変換
- Laser guide star adaptive optics
Subaru telescope on the summit of Mt. Mauna Kea in Hawaii
- 構成・要素技術
新しい光学材料の導入
共振器設計
音響光学の制御
電気光学の制御
補助光学の制御
- 制御項目
光長周期回転
スペクトル分析
時間変形・光パルスの時間幅
光パルスどうしの同期
出力エネルギー・出力パワー
繰り返し速度
波形・ビームプロファイル
偏光

医療

非侵襲血糖値計測システム

被験者の負担を軽減し、日常生活における血糖値管理、特に糖尿病患者の血糖値自己管理のために、レーザーを使った非侵襲的・非接触計測可能な血糖値計測システムの開発を進めている。

ルテイン計測装置

加齢とともに眼に発症する加齢黄斑変性は、眼の黄斑部に存在するルテインの量に関係すると言われている。ルテインの吸収波長のピーク430 nm付近にあることから、Tisapherレーザーの第二高調波を利用してルテイン計測手法の開発を行っている。※ルテイン(Lutein)はカロチノイド(色素)の一種で、光遮蔽効果がある。

水晶体弾性度測定に基づいた定量的老視診断機器

老視(老眼)は年齢に伴う水晶体の弾性が失われる病態である。光音響効果と干渉技術を用いて水晶体の弾性度を定量的に測定するための定量的老視診断装置を開発を進めている。

ヒト呼気成分の微量分析システム

ヒトの呼気中の揮発性有機化合物の成分と疾患との間に因果関係があることが示されている。我々は、呼気中のガス成分をモニタリングし健常状態を診る装置を開発している。

インフラ

トンネル内壁の非接触・高精度形状計測技術及び高速表面欠陥検出技術

社会インフラ老朽化による事故を未然に防ぐレーザー誘起光音響測定装置

反射強度・段差情報(レーザーのみ可能な底面情報をもつて表面を削除するアーリス(右図))

コンクリート・木造・金属等の構造物

■ 施設構造用構造計測システムによる高精度3次元形状計測
■ キヤン(左図)

農業

電子制御波長可変レーザーを用いた糖度の非破壊計測

强度・波長指令
電子制御 波長可変レーザー
强度計(制御)
検出器
試料表面

2.94 nm近赤外の波長で
强度が得られるため、本レーザーは水や生体組織に高い吸収を持つため、歯科治療に有効なレーザーである。

歯科治療に必要なレーザーの開発、レーザーの条件(パワーマルクの変化)による治療効果の違いの科学的検証を行っている。

次世代歯科治療用レーザー

レーザー出力: 30 μW
レーザー波長: 3.39~3.40 μm
スペクトル幅: <50MHz
ビームプロファイル: TEM₀₀
ビーム直径: 2.01 mm
エネルギー: 1.6 J/cm²
パルス幅: 25 ns
パルス間隔: 25 mm

レーザー回路
光ファイバ
クリスタル
ミラー
受光器
マイケルソン干渉計
干涉計用レーザー光
前房角膜
水晶体
眼の断面
受光器

宇宙デブリの脅威

2022

- Number of debris objects regularly tracked About 30,910
- Number of functioning satellite About 5,400
- Number of break-ups, explosions, collisions, or anomalous events resulting in fragmentation More than 630
- Number of debris estimated
more than 10 cm: 36,500
1 cm~10 cm: 1,000,000
1 mm~1 cm: 130 million



Enormous the number of debris in space. That number continues to increase

Reference from ESA HP as of 04 Apr 2022
https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers

5G, 6G, GPSといった経済活動に伴う衛星が急増する

これまで提案されている方式

機械的による捕獲

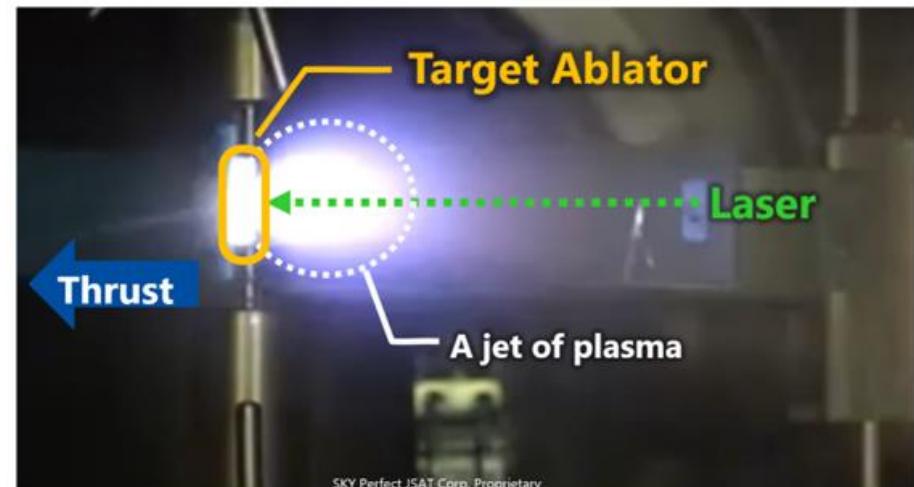
詳細：

- ・ロボットアームによる方式（米国、欧州）
- ・実用的なネットによる方式（欧州）
- ・ハープーンによる方式（欧州）
- ・磁石による方式（日本）

捕獲された衛星は高度を下げる、大気圏に突入して処分される。

非接触方式（本提案）

レーザーアブレーションにより生じる反作用インパルスを利用して、デブリの速度を制御し、軌道を変更する。



本手法の利点は 非接触 であること。

レーザーアブレーション法の特徴

①高い安全性

- 物理的接触を伴わずに、機能を失った衛星の速度を低下させることができる。

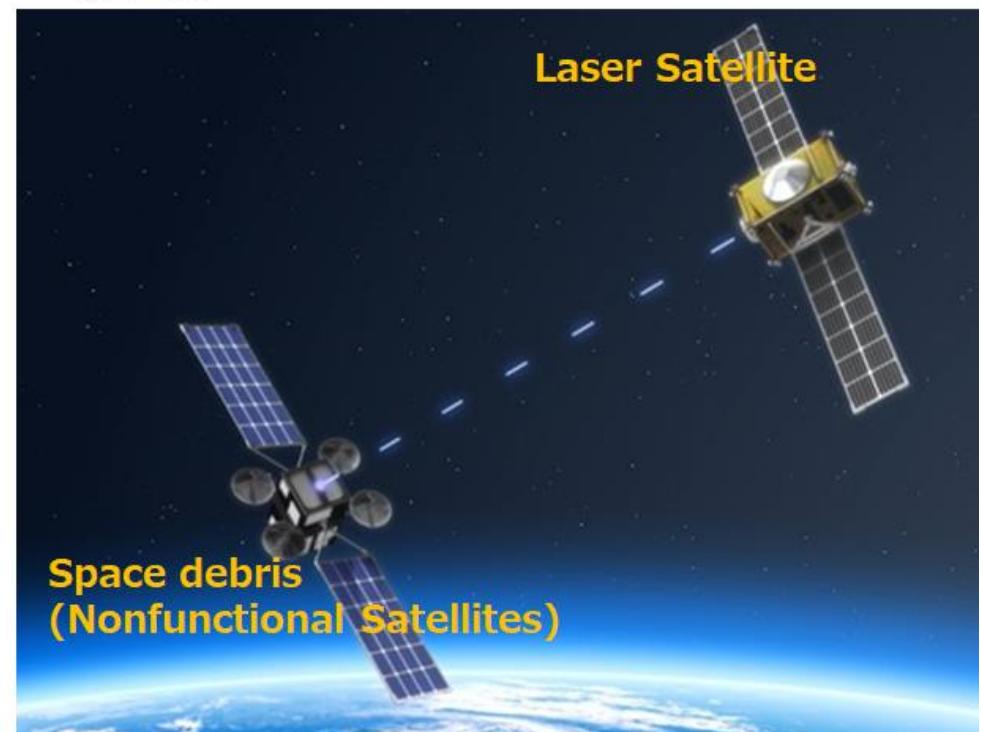
②適応性

- 照射位置とタイミングを選択することで、目標物の回転を停止させることができる。

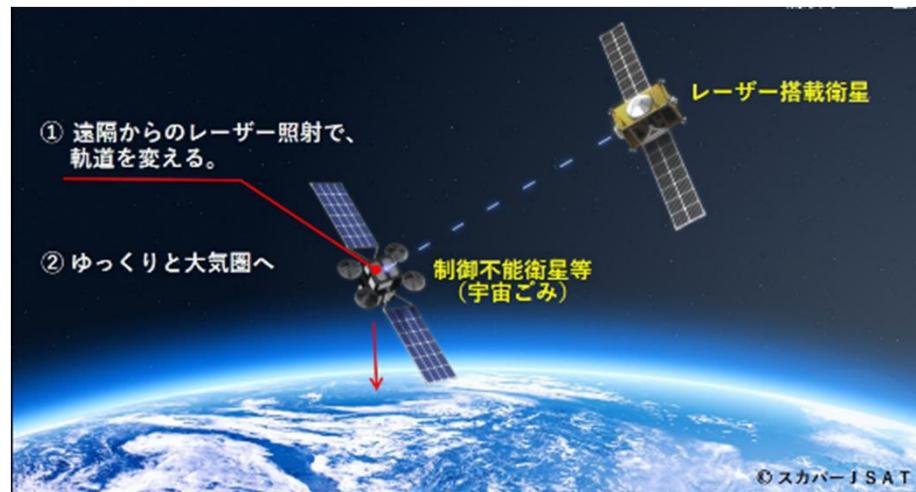
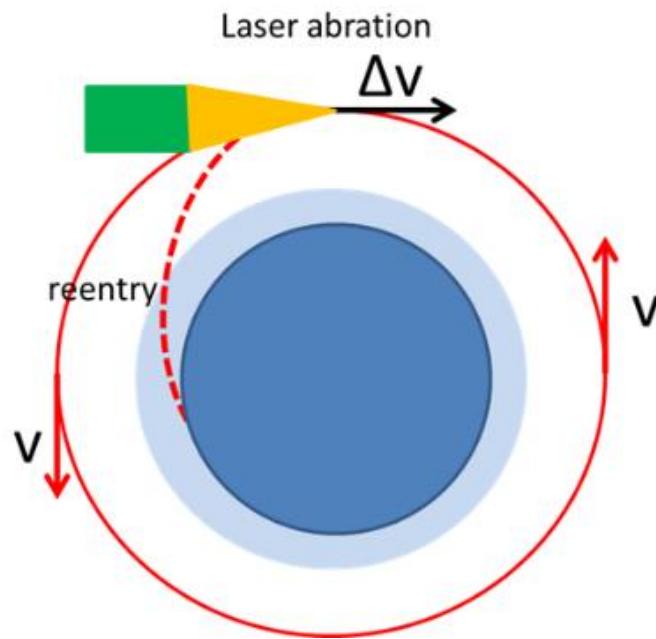
③高い経済性

- レーザー衛星は、機能を失った衛星に対応するための追加燃料を搭載する必要がない。
- 顧客の衛星に、把持用ハンドルなど特別な追加仕様を設ける必要がない

デブリの高度が下がるに合わせレーザー衛星もイオンスラスターで高度を下げながら追跡する。

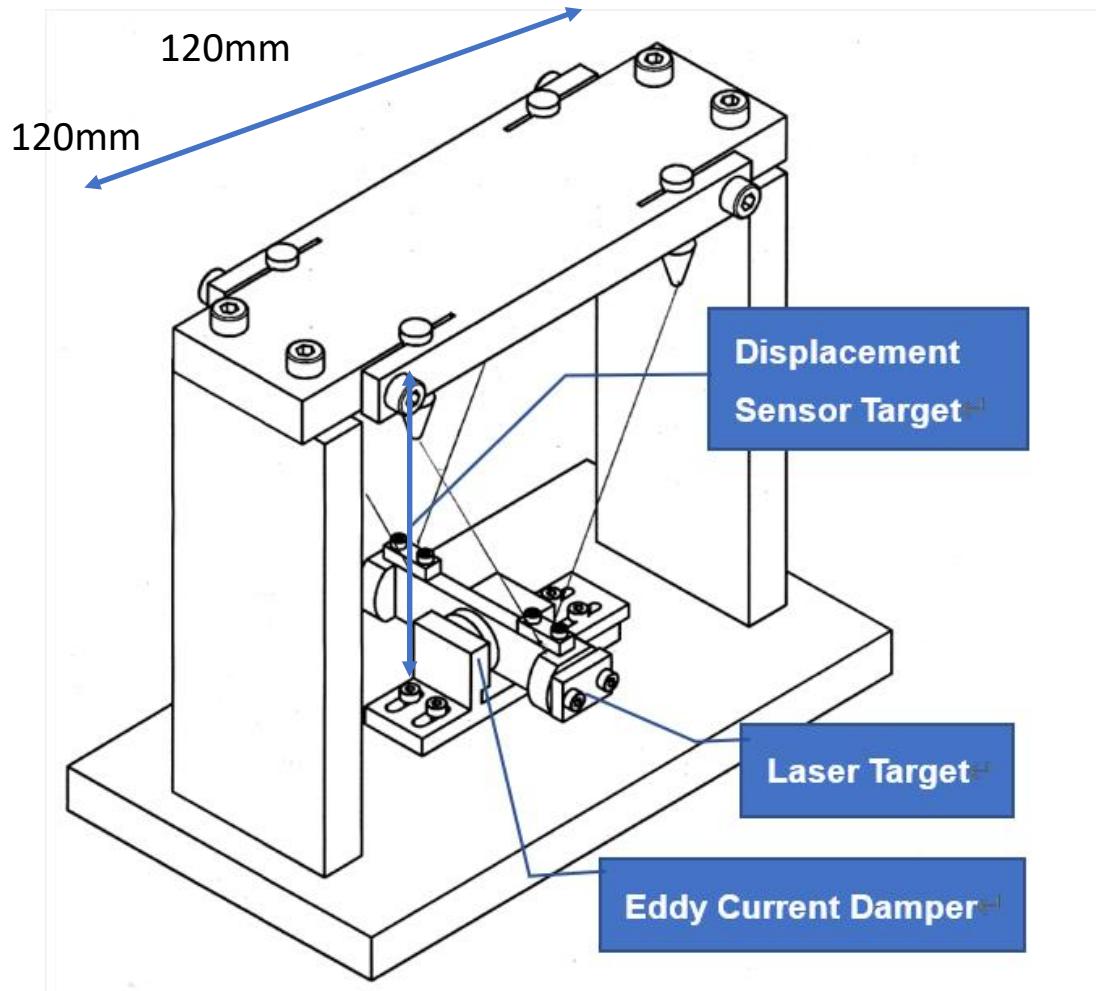


レーザーアブレーションにより発生する力積によりデブリの速度を減速させ、軌道を制御

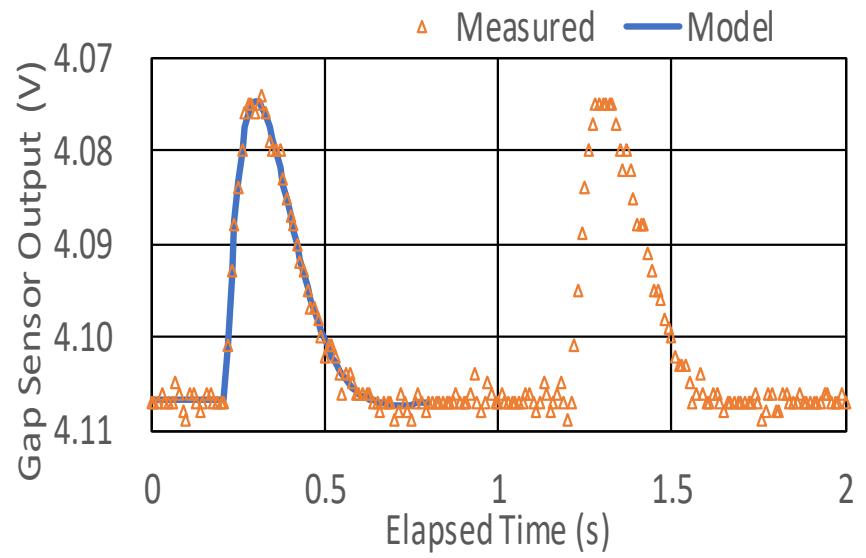
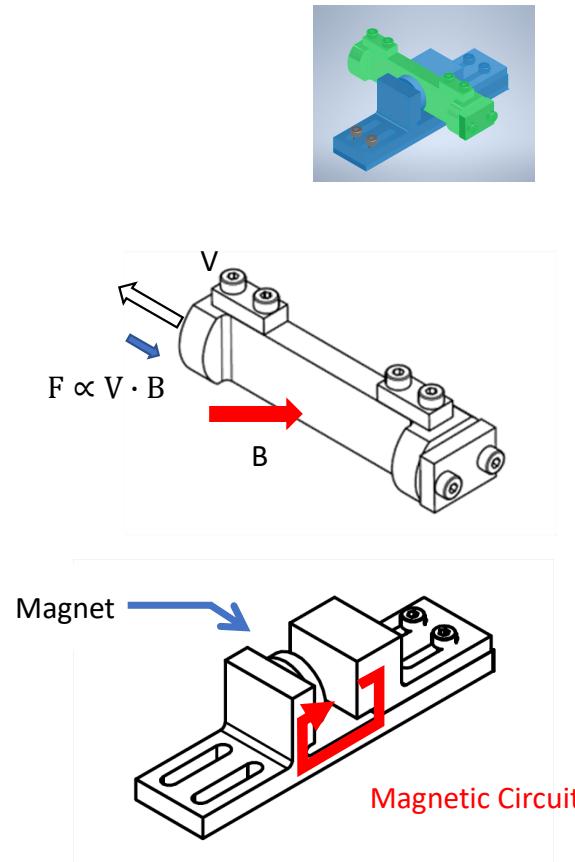


ロボットアームで捕まえる方法などが提案されているが、回転しているデブリ衛星の捕獲は危険である。レーザーアブレーションによる手法はこうした危険性がない。

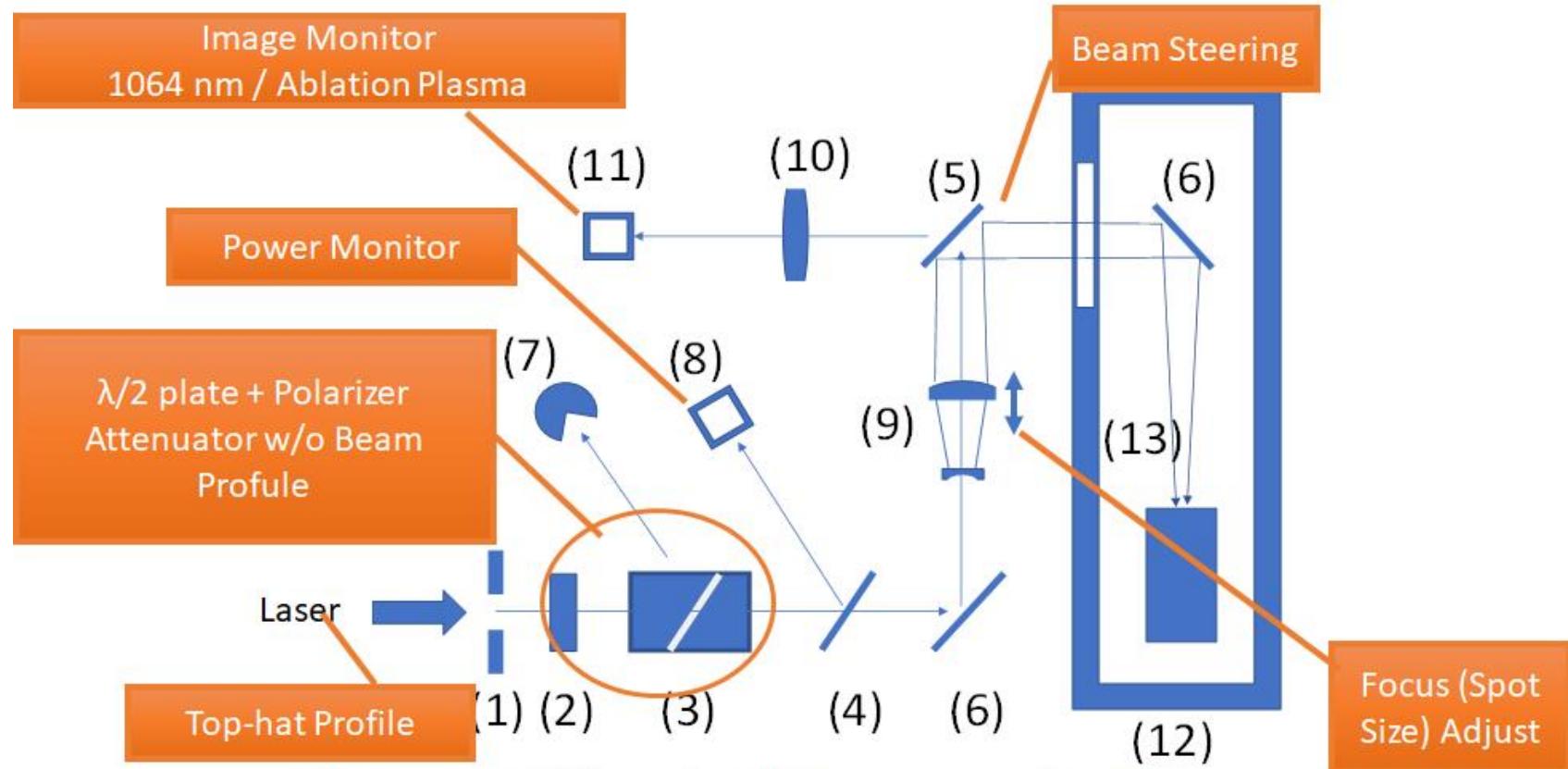
2重振り子による力積の計測



エディーカレントによるダンパー



計測装置の概略



(1) Aperture, (2) 1/2 Wave plate, (3) Polarizing beam splitter, (4) Beam splitter, (5)(6) High reflection mirror, (7) Beam dumper, (8) Energy meter, (9) Beam expander and focus adjust, (10) Imaging lens, (11) Image monitor, (12) Vacuum chamber with optical ports and (13) Impulse Stand

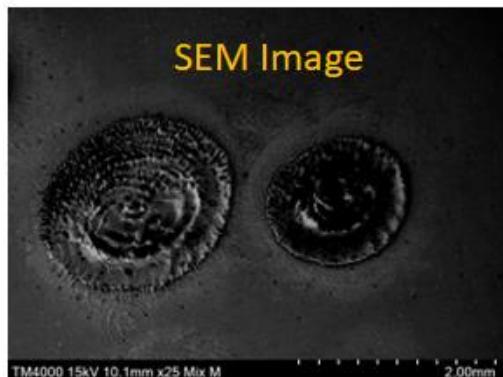
計測結果

Laser: GCR-230,SPECTRA-PHYSICS

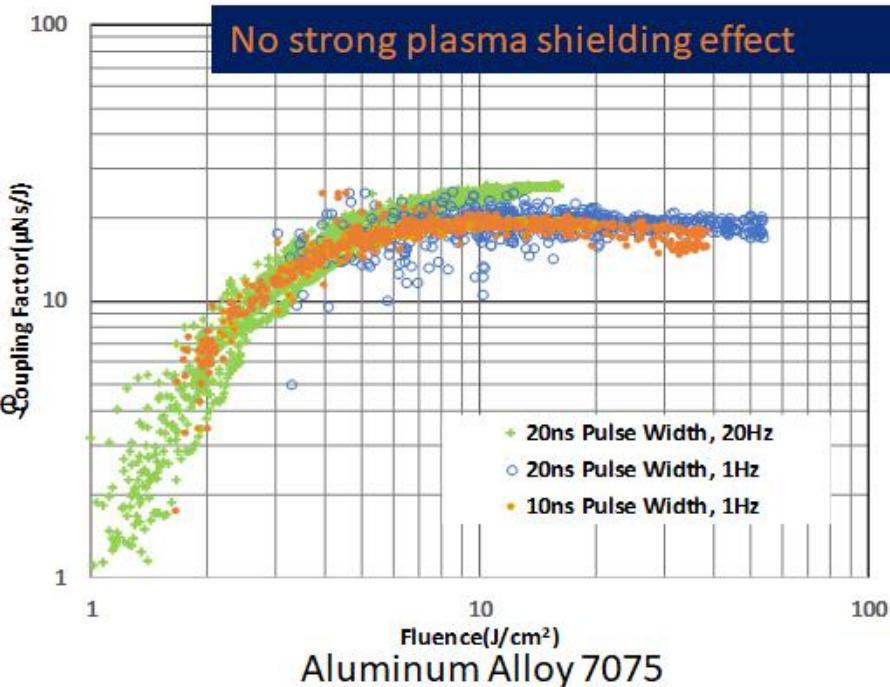
- Nd:YAG (1064nm)
- Pulse width: 10~25ns
- Maximum energy: 1J
- Maximum frequency: 25Hz

Impulse measurement for various laser fluence.

- Tuning laser for specific operating condition, pulse rate, pulse width.
- Focusing adjust for specific focus size, typically 4 focus size.
- Scanning power level by the polarizer attenuator

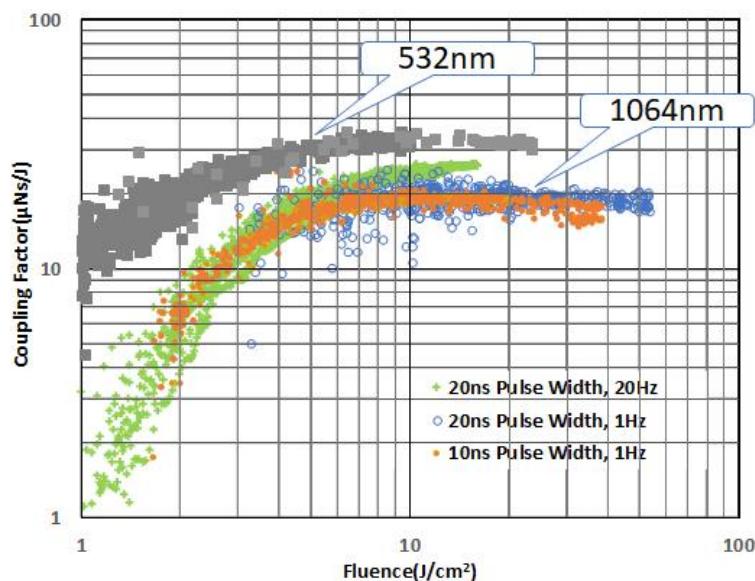


LSSE 2020, April 23



- 1Hz pulse rate:
Direct impulse measurement
- 20Hz pulse rate:
Impulse measured by average force.

高効率化に向けて



Introduction of SHG

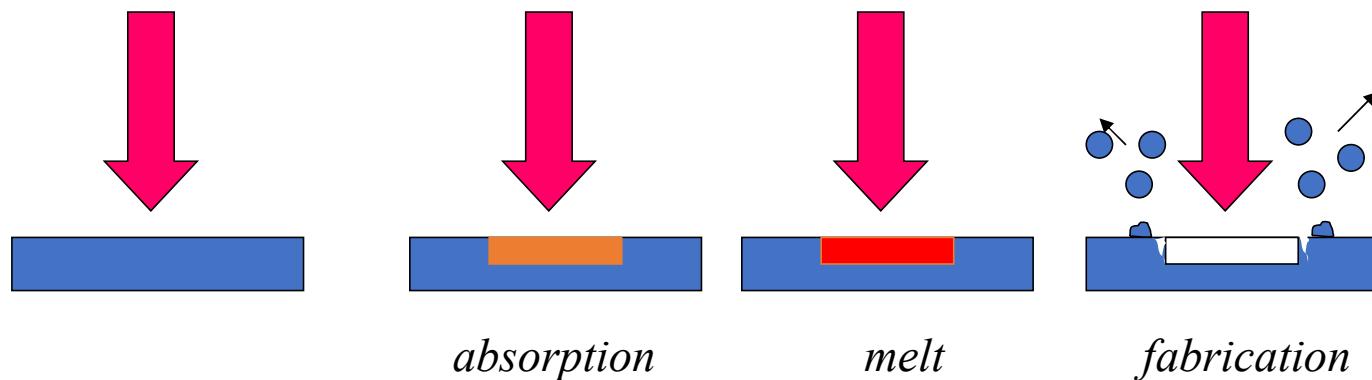
- Efficiency increase by 1.5 times
- Realization of impulse generation at low fluence

These results show by using the laser, we realize the removal of the 150kg class satellite within several months several and stop the rotation within several days..

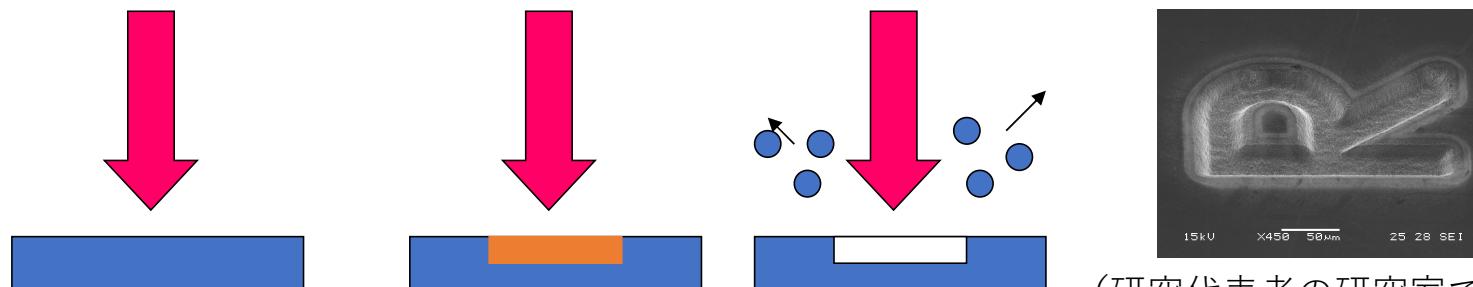
ターゲット: アルミ合金A7075

レーザーアブレーションによる加工

ナノ秒レーザー (熱効果が残る)



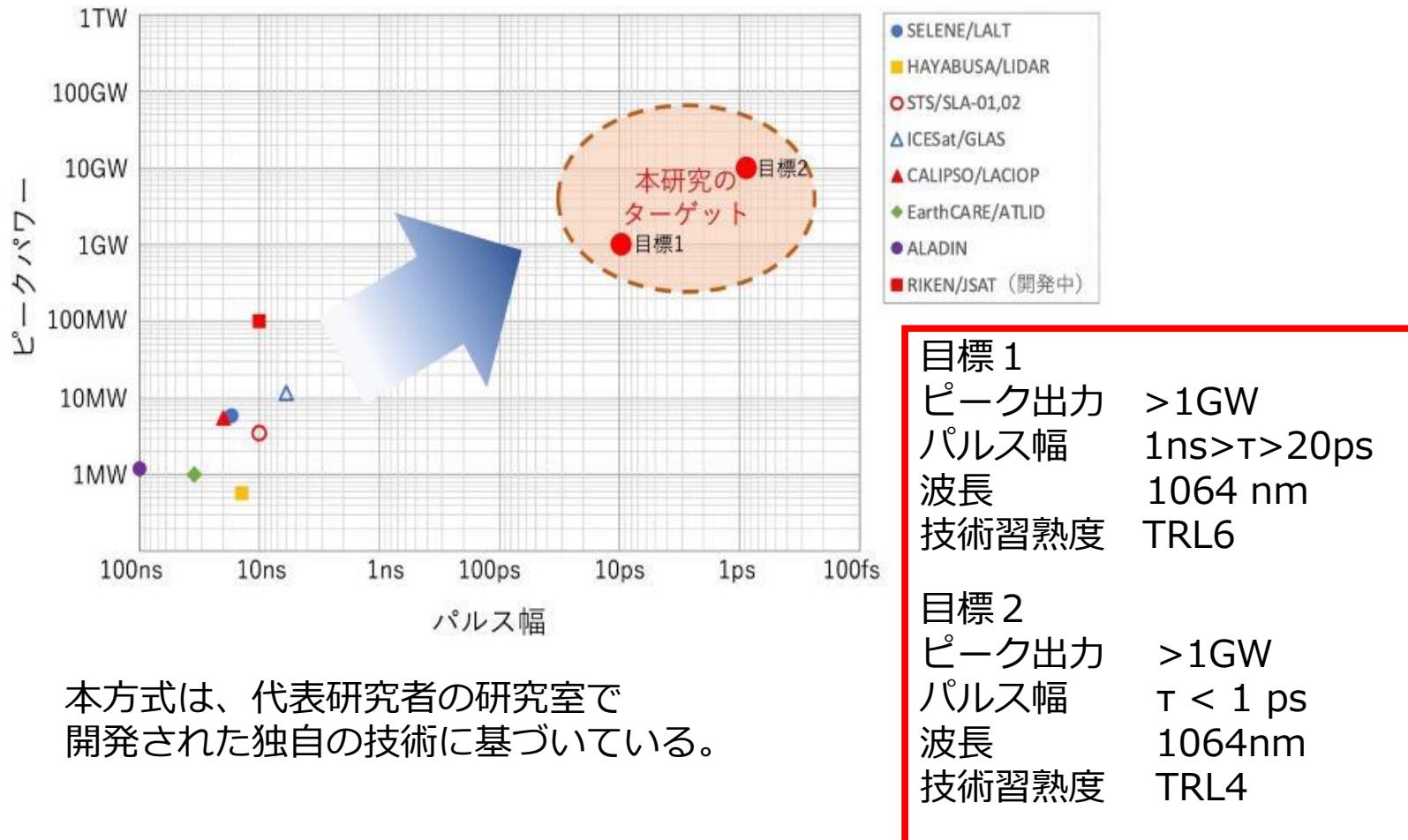
ピコ秒、フェムト秒レーザー (比熱加工)



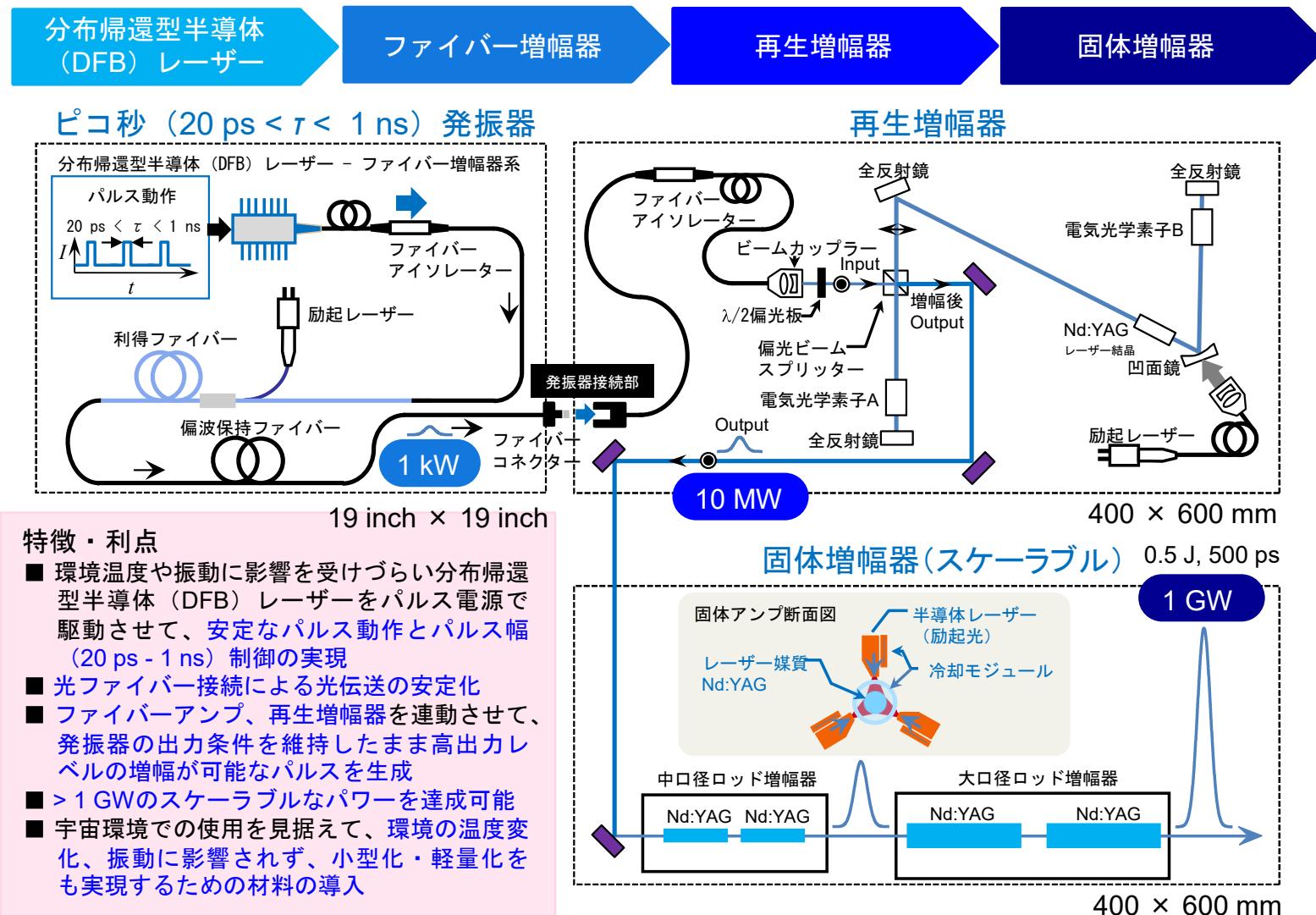
(研究代表者の研究室で実施)

Absoption and reaking bonding between atom and molecules
原子と分子間における吸収および結合の切断

宇宙用大出力パルスレーザーの現状と本開発の目標



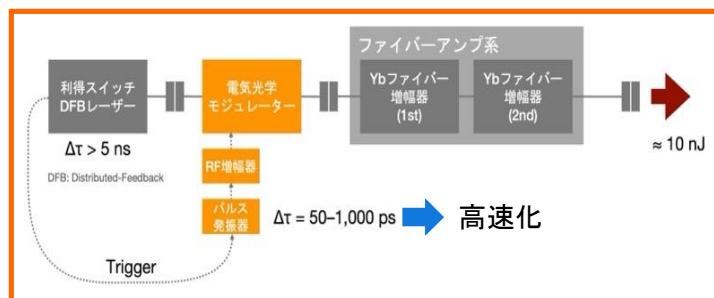
宇宙用大出力レーザーシステム構想



ピコ秒発振器：システムと出力特性

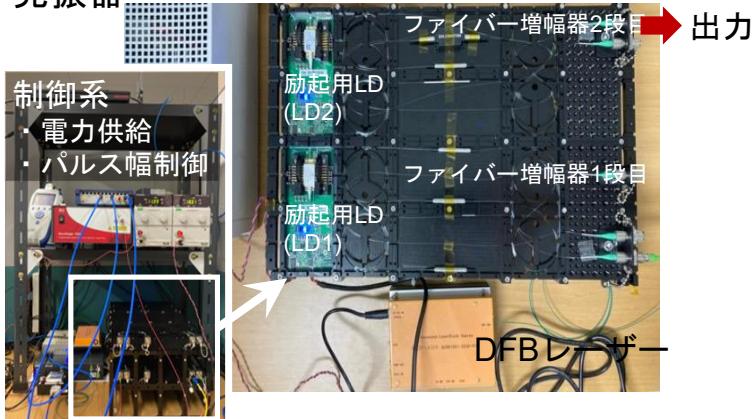
■ ピコ秒発振器の構成

分布帰還型半導体（DFB）レーザー+ファイバー増幅器



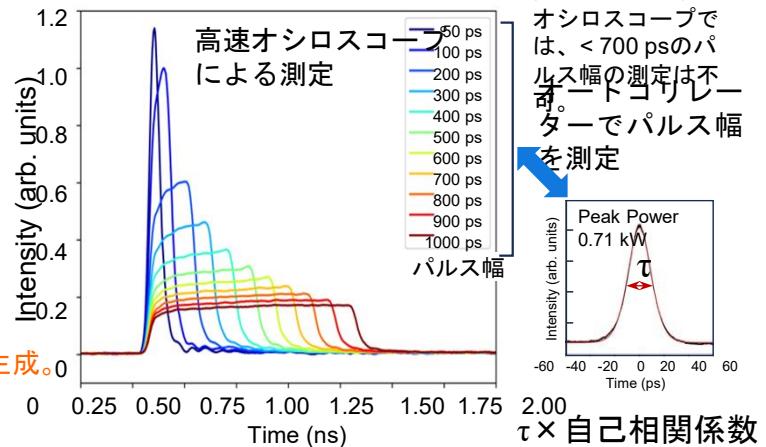
5 nsパルスに電気光学的変調を施し、より短い時間幅のパ

発振器



**オール光ファイバー光伝送方式
安定、堅牢、軽量、小型（超小型化が可能）**

■ パルス幅制御

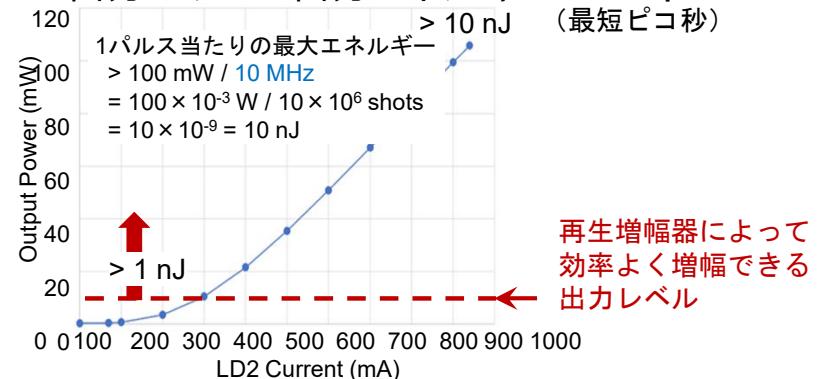


高速（20 G程度）
オシロスコープでは、< 700 psのパルス幅の測定は不可能。
タードコリレーーでパルス幅を測定

A graph showing Intensity (arb. units) on the y-axis versus Position on the x-axis. The x-axis ranges from -60 to 60, with major ticks at -60, -40, -20, 0, 20, 40, and 60. A single, sharp peak is centered at 0.71 kW. The peak is labeled with its value, 0.71 kW, above it. The peak has a red outline and a small red arrow pointing to it. The background is black, and the plot area is white.

$\tau \times$ 自己相関係数

■ 出力パワー・出力エネルギー = 14 ps



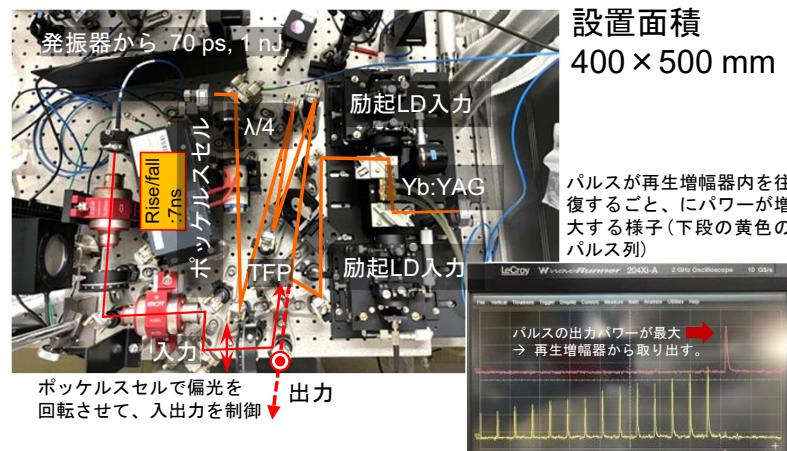
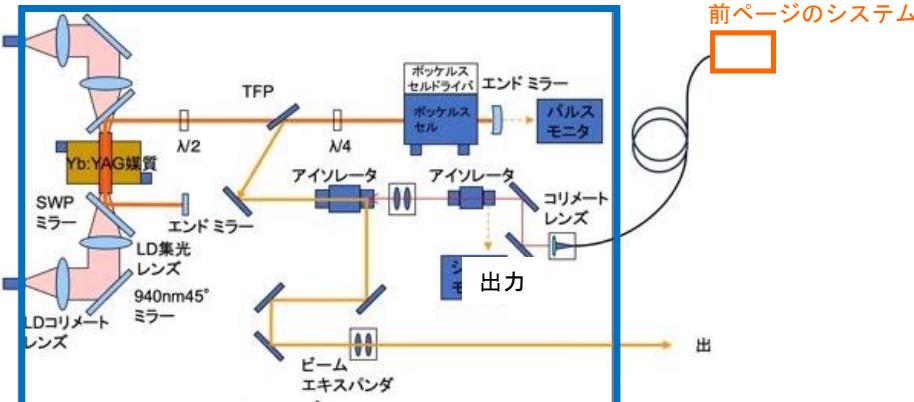
再生増幅器によって
効率よく増幅できる
出力レベル

PC制御より、20 ps – 1 ns領域で
高速かつ任意に変更可能（世界初）

*本パルス幅制御方式は2025年1月末特許出願

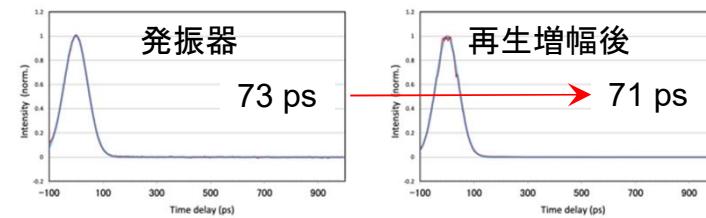
再生増幅器：システムと出力特性

■ 再生増幅器の構成

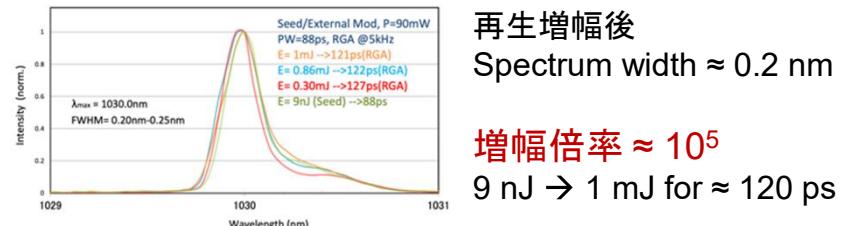


600 × 900 mm (開発開始時) から
400 × 500 mmへと小型化が実現

■ 発振器、再生増幅後のパルス幅の比較



■ 再生増幅後のスペクトル・増幅倍率



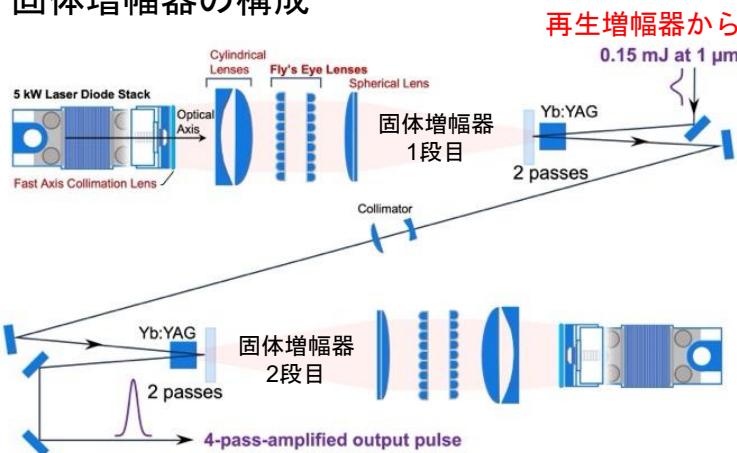
■ 再生増幅器の出力特性

	Input	Output
Repetition rate	10 MHz	5 kHz
Energy	9 nJ	0.8 mJ
Pulse duration	73 ps	71 ps
P _{peak}	70 psでの実験データ (一例)	1 MW

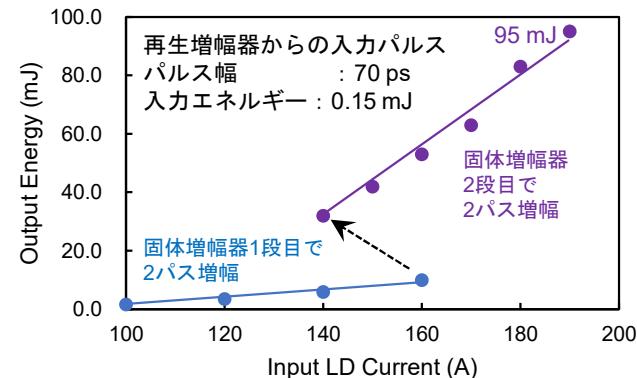
発振器から出力された超短パルスを
> 10 MW (1 mJクラス) まで再生増幅可能
次段の固体増幅器で効率よい増幅が可能

固体増幅器：システムと出力特性～レーザー全システムの実現

■ 固体増幅器の構成*

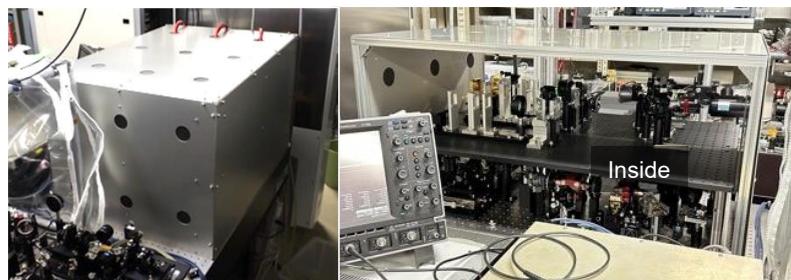


■ 固体増幅器の出力特性



$$95 \times 10^{-3} \text{ J} / (70 \times 10^{-12} \text{ s}) \approx 1.36 \text{ GW}$$

■ ピコ秒レーザーエンジニアリングモデル



次世代のLDビームの強度均質化及び集光法の確立

本成果は、従来の高出力レーザー限界を突破する技術となる。

■ 成果・今後の見通し

ピコ秒レーザー成果

- ・中間評価時の目標性能を達成した。
- ・固体増幅器の増幅倍率630倍によって、レーザーを用いた宇宙開発は > 1 GW を視野に入れた取り組みへ展開
- ・エンジニアリングモデル (EGM) が完成

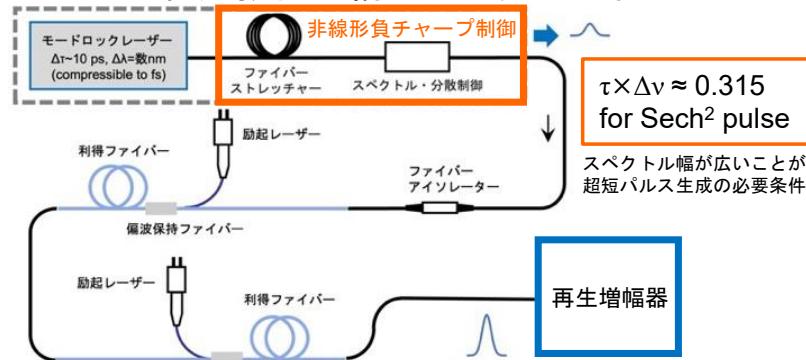
現在の開発展開

- ・中間評価後、EGM用いた性能評価、安定化開発へと展開
- ・次年度 (R7) から実施予定の地上応用による実証試験の準備を前倒しで開始する。

*本固体増幅の方式は2025年2月中旬特許出願予定

フェムト秒システム：システムと出力特性

■ フェムト秒発振器の構成（安定化過程の1例）



フェムト秒システムの基本系（従来に比べ、高い安定性が望める）
= ピコ秒発振器 + 再生増幅器 + パルス圧縮光学系

この方法の当初の問題点

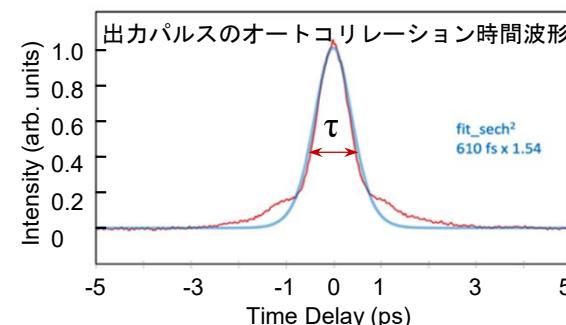
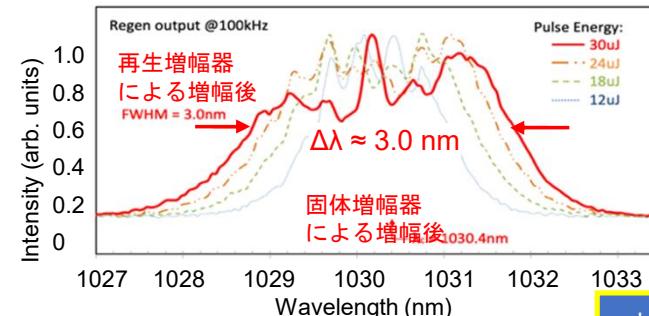
- 再生増幅器内での増幅時に実効利得幅が減少
- レーザー光のスペクトル線幅の減少 ($\Delta\lambda = 10\text{ nm} \rightarrow 1.6\text{ nm}$)
- フェムト秒の維持が困難

問題点の解決、フェムト秒出力を実現

- スペクトルプロファイル及び非線形負チャープ制御による入力パルスの短パルス化
- (a)の短パルス化により、再生増幅器内におけるパルス強度の増大
- 自己位相変調 (SPM) を誘導 → スペクトル線幅の減少量の低減
- (a)-(c)の方法 + パルス圧縮によりフェムト秒パルスを出力
10 MW級（固体増幅器で十分に増幅できる）のピークパワーを実現

従来式から再生増幅法を進化「レーザースペクトル線幅拡張増幅」へ
(a)+(b)+(c)+(d)+固体増幅器による増幅+パルス圧縮によりフェムト秒化実現

■ 拡張スペクトル線幅、フェムト秒発生



中間評価時（10月29日）
 $\tau \times \text{自己相関係数} = 903\text{ fs}$

中間評価後
= 610 fs
まで短パルス化が可能
パルス幅のプログラマブル制御の技術視野を新たに獲得。

■ フェムト秒システム出力特性（1例）

	発振器	再生増幅器	パルス圧縮	固体増幅器
Rep. rate	10 MHz	100 kHz	100 kHz	10 Hz
Energy	100 pJ	30 μJ	30 μJ	> 1 mJ
Pulse Width	10 ps	3.4 ps	610 fs	900 fs*
P _{peak}	10 W	9 MW	33.3 MW	1.1 GW

*固体増幅器内における利得幅減衰

達成目標と状況

達成目標（計画書）と達成状況

宇宙用大出力パルスレーザーの開発のうち、ピコ秒パルスレーザーは、宇宙用レーザーとしてのTRL4（宇宙用）レベルを、フェムト秒パルスレーザーは、ピーク出力、パルス幅、波長の目標を達成する。

中間評価時における達成目標			出力特性	状況
目標1	ピーク出力	> 1 GW	1.36 GW	○
	パルス幅(τ)	ピコ秒領域 $20 \text{ ps} < \tau < 1 \text{ ns}$	70 ps	○
	波長	1 μm	1.03 μm	○
	技術習熟度	TRL4（宇宙用）	TRL 4: Engineering model	○
目標2	ピーク出力	> 1 GW	1.20 GW	○
	パルス幅(τ)	フェムト秒領域 $\tau < 1 \text{ ps}$	840 fs	○
	波長	1 μm	1.03 μm	○
	技術習熟度	上述出力特性の達成	光学定盤上実証系	○

技術成熟度レベル(Technology readiness levels, TRL) は、宇宙機の開発において技術の成熟度の指標を示す。

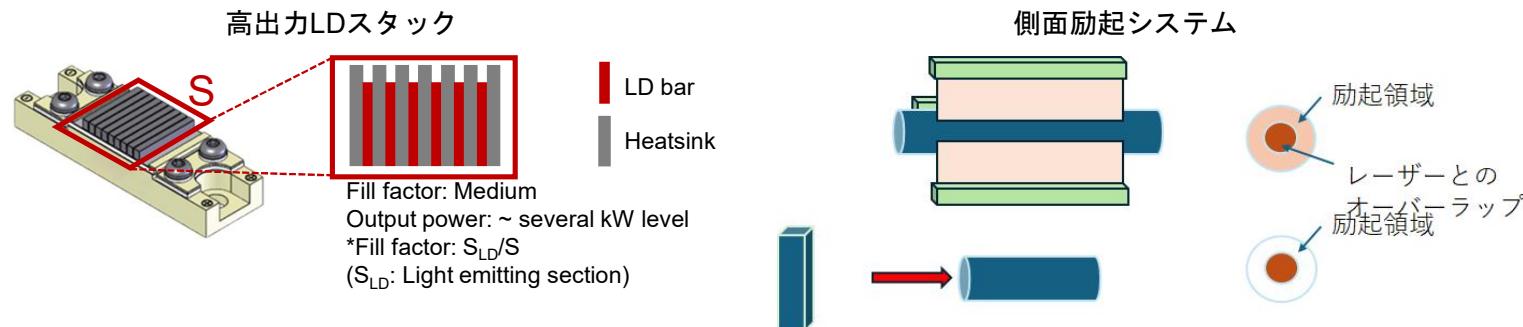
TRL4は「ラボレベルでの実証」、TRL6は「地上でのシステムとしての技術成立性の確認」を表している。

参考URL : https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level

本研究によるレーザー成果とその将来の発展性について

■ LD STACK限界集光法の実現

高エネルギーパルス動作のLDは、角形のエミッターが一列に並ぶLDバーを複数使ったスタック構造となっている。出力されるビームは角型で、しかもビーム整形の自由度が極めて低い。そのため、従来、その使用は側面励起法に制限されていた。本研究の成果により、高効率に、熱レンズを飛躍的に低減できるオーバーラップの優れた励起法、端面励起法（レーザーの発振軸上を励起する方法）が可能となった。この方法は、レーザーの出力を大幅に引き上げる技術である。高出力エネルギーレーザーの必須方法として、リソグラフィー用のレーザー、核融合用のレーザーなどの実現へと波及していく。



■ AIレーザーの実現

IT、AIのそれぞれの技術とともに、高速、連続、ランダムにパルス幅を変更しながら、最適なレーザー照射条件を機械学習、ディープラーニングとともに学習していくAIレーザーが実現。

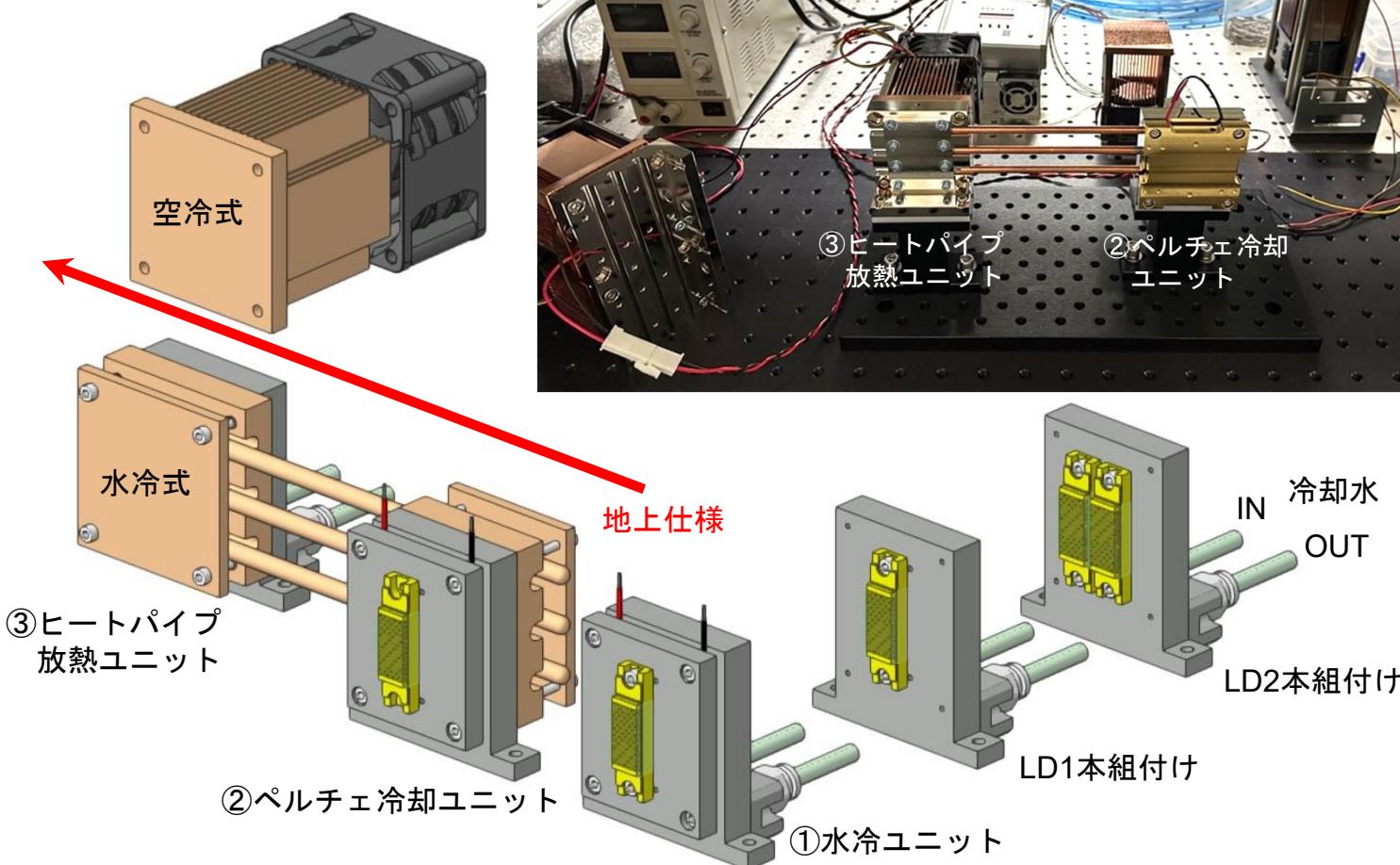
レーザー衛星運動制御・デブリ除去の「究極の微調整」が可能になる。レーザー加工、レーザー治療他、レーザー光-物質相互作用の研究にも必須、レーザー応用研究のディファクトスタンダード技術となる。



図は、レーザーのパルス幅の自動変更のさま（説明時は動画を紹介）。出力エネルギーを一定にすることができる。この技術をAI化することにより、「レーザーを照射する必要のある」各種研究・開発において、パルス幅の最適条件をレーザーが見つける時代が到来する。

今後の取り組み

固体増幅器 排熱原理試験 進行中



LD (2 - 5kW等) の性能と放熱方法などを調査する基礎実験ユニット

①水冷ユニット (基準の排熱係数: η_W)

水冷ユニットはチラーを用いて温度制御を行いましたLDを1本又は2本と付けることが可能

LDの性能評価、発熱量、温度変化による出力と波長依存性、許容範囲などを調査に用いる。

②ペルチェ冷却ユニット (η_P / η_W)

水冷ユニットにサーモモジュールを取り付けた構造

サーモモジュールによる温度安定性と電気的容量 (minimum値) などの調査用

③ヒートパイプ放熱ユニット (η_{HP} / η_W)

水冷式: さまざまなヒートパイプの性能評価

空冷式: レーザー筐体 (あるいは衛星筐体) を介した排熱の性能評価²²

熱真空試験システムの開発・試験準備



性能

- (1) 尺寸：内部に500 mm × 600 mm × 300 mmのレーザー筐体を収容
- (2) 圧力領域： 10^{-5} Pa ~ 大気圧（放電危険領域を含む： $1.33 \text{ Pa} - 1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ）
- (3) 排氣能率： $> 650 \text{ L/s}$
- (4) 封入分子種類：Air、O₂、N₂、He
- (5) リーク量検出分解能： $> 1.0 \times 10^{-11} \text{ Pa}$
- (6) 輻射流入温度：40°Cまで（上限）
- (7) 温度制御方法：太陽光スペクトルに類似したスペクトルを有する電磁波放射等も検討

まとめ

- ・レーザーアブレーションを利用した宇宙デブリ除去のための宇宙用レーザーの開発を進めている。
- ・目的の出力レベルが達成され、熱のヒートパイプによる輸送など宇宙機の対応を進めている。

謝 辞

- 本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596の支援を受けたものである。