



A. Yogo

高平均出力パワーレーザーへの挑戦： 100 J/100 Hz モジュール SENJU

余語 覚文*

1. はじめに

高いパルスエネルギーを持つパワーレーザーは、従来技術では到達が難しかった高密度・高温・高圧力といった高エネルギー密度 (HED) 状態を生成できることから、現在多方面で重要性が増している。これにより、宇宙・天体物理の現象の理解、惑星内部の状態探査、高圧環境下での新材料の探索、高速の電子・イオンビーム発生、さらにはレーザー核融合といった幅広い応用分野で大きな進展が得られている。例えば、パワーレーザーの照射によって発生する衝撃波を X 線自由電子レーザーによるポンプ・プローブ法で計測することで、結晶中の欠陥 (転位) が物質固有の音速より速く伝播することが初めて実証¹⁾された。また、パワーレーザーによって加速された百万電子ボルト級の重陽子を中性子に変換するレーザー駆動中性子源²⁾を用いて、物質の元素・同位体種を瞬間的に透過計測する手法も実証されている。

近年では、世界最大級のレーザー施設である米国ローレンス・リバモア研究所の国立点火施設 NIF (National Ignition Facility) が総パルスエネルギー 1.8 MJ のシステムを用いて、史上初となる核融合点火を報告³⁾したことが大きな話題となった。一方で、NIF のレーザーはフラッシュランプ励起のガラス媒質を採用しているため、冷却の制約から 8 時間に 1 回しかショットが行えないという課題を抱えている。

応用展開を見据えた場合には、「高いパルスエネルギー」と「高繰り返し動作」を同時に満たす、すなわち高平均出力が実現できる、新しいパワーレーザー技術が不可欠となる。高平均出力を可能とするレーザー増幅機構として、従来のフラッシュランプに代わり、半導体レーザー (LD) を励起光源とした固体レーザー (Diode-Pumped Solid-State Laser: DPSSL) が有力視されており、各国が開発を推進している。

本稿では、高平均出力を達成する DPSSL の研究動向について紹介した後、大阪大学レーザー科学研究所で開発している、出力パルスエネルギー 100 J、パルス繰り返し数 100 Hz (平均出力 10 kW) のパワーレーザーモジュール SENJU (Super Energetic Joint Unit) について報告する。

2. 高平均出力レーザーの開発動向

先駆的な成果として、米国ローレンス・リバモア国立研究所では Nd 系ガラス (Nd:APG-1) を利得媒質に用いた DPSSL によって、出力パルスエネルギー 70 J・パルス繰り返し数 3.3 Hz (平均出力 230 W)⁴⁾を実証した。一方、より高い熱伝導性や熱衝撃耐性を持つ利得媒質として、Yb 系結晶・セラミックが近年注目されている。Yb 系材料が高平均出力向けに適している理由としては、(i) 励起波長 (940 nm) と発振波長 (1030 nm) が近く量子欠損が小さいため高効率動作が得られること、(ii) 蛍光寿命が約 1 ms と長くエネルギー蓄積に有利であること、(iii) 吸収帯が広いこと、などがある。また、YAG (Yttrium Aluminum Garnet) をホスト材料として用いることで、熱伝導率の高さによる熱負荷の軽減も期待できる。

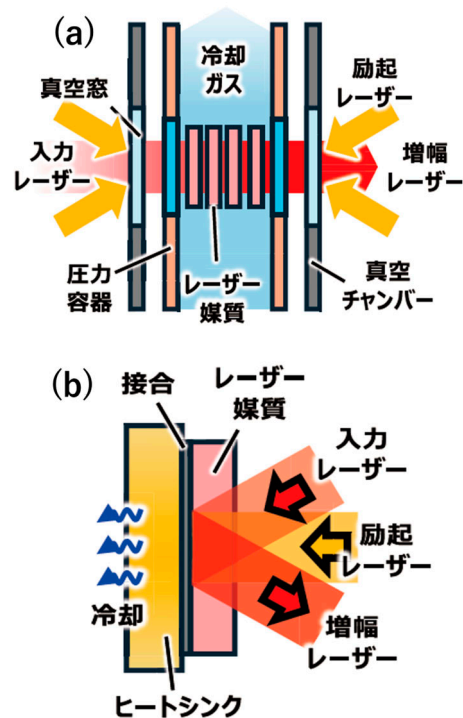


図 1 低温冷却 Yb:YAG レーザーの増幅方式の例：
(a) マルチスラブ増幅 (b) アクティブミラー増幅

*大阪大学 レーザー科学研究所 教授

最近では、冷却した Yb:YAG を用いた高平均出力レーザーが各国で実現されてきている。室温における Yb³⁺ のエネルギー準位構造は準 3 準位系であり、室温でも下準位に熱励起された原子が残るため、再吸収によって利得が低下する問題があるが、200 K 以下まで冷却すると、下準位への熱分布が 1% 未満になり、実質的に 4 準位レーザーに近い特性を示す。また、低温下では YAG の熱伝導率が向上する利点もある。英国ラザフォード研究所 CLF とチェコ科学アカデミー HiLASE では、ヘリウムガスによって複数の薄い Yb:YAG セラミックを冷却するマルチスラブ方式 [図 1 (a)] により、150 J・10 Hz (1.5 kW) ⁵⁾ を達成した。国内でも浜松フォトンクスらのグループが同方式を採用することで、253 J・0.2 Hz (50 W) ⁶⁾、さらに近年では 200 J・10 Hz (2 kW) ⁷⁾ の出力を実証している。

一方、大阪大学では、薄い Yb:YAG セラミックの背面に金属製ヒートシンクを貼り付け、固体間熱伝導を利用して冷却性能を高める低温アクティブミラー増幅器 ^{8,9)} を独自に開発しているため、以下に紹介する。

3. 低温冷却アクティブミラー増幅器

図 1 (b) に低温冷却アクティブミラー増幅 ^{8,9)} の概念図を示す。アクティブミラー増幅では、利得媒質である Yb:YAG セラミックディスクの裏面に高反射膜が設けられており、これを金属製ヒートシンクへ接合したうえで、循環式の液体窒素により冷却する方式を採用している。励起光として LD 光を入射している間に、入力レーザーパルスがディスクに入射し、背面で反射されて出射する間に増幅される。入力レーザーのエネルギーが増えて反射されることが“アクティブ”ミラーと称される所以である。ガス冷却の場合と比較して固体間熱伝導の熱流速は約 10 倍となるため、アクティブミラー増幅方式ではレーザー媒質の除熱性能を大幅に向上できる。これにより、これまでになく高い繰り返し数と高いパルスエネルギーを両立する新しいパワーレーザーが可能となるのである。

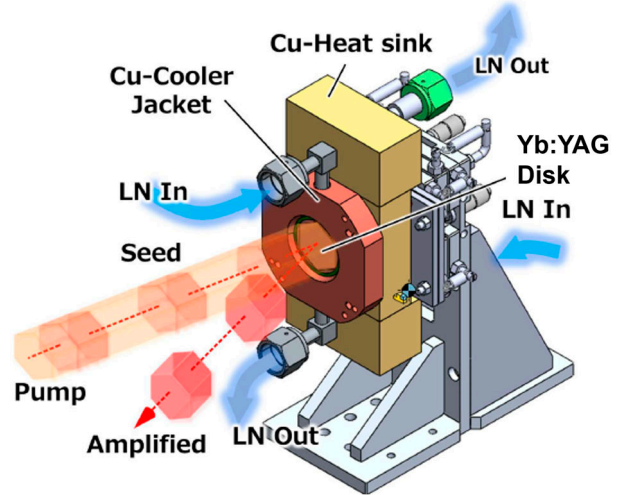


図 2 5 cm 級アクティブミラー増幅器のレーザーヘッド構成図 ^{8,9)}

図 2 に阪大の開発した直径 5cm 級の Yb:YAG セラミックディスクを使用したアクティブミラー増幅器のレーザーヘッド構成を示す。YAG は一般的なヒートシンク材料である銅などと比べて熱膨張係数が大きく異なるため、通常の接合技術では冷却時に相当な応力が発生し、波面の歪みや複屈折の原因となる。特に数センチメートル級の大口徑 Yb:YAG セラミックディスクでは、発生応力が 10 MPa を超えると見込まれ、レーザービーム品質への影響は無視できない。この問題を抑制するため、温度変化に対して YAG と近い熱膨張係数を持つモリブデン (Mo) に Yb:YAG ディスクを接合する方法が採用された。加えて、大口徑の利得媒質で問題となる寄生発振による増幅率の低下を防ぐために、励起によってディスク内部に生じる蛍光を吸収する目的で、外周部に Cr⁴⁺ を添加した YAG セラミック (Cr:YAG) をエッジクラッドとして接合している。エッジクラッドに取り込まれた蛍光は熱に変換され、ヒートシンクへ伝わって排熱される。

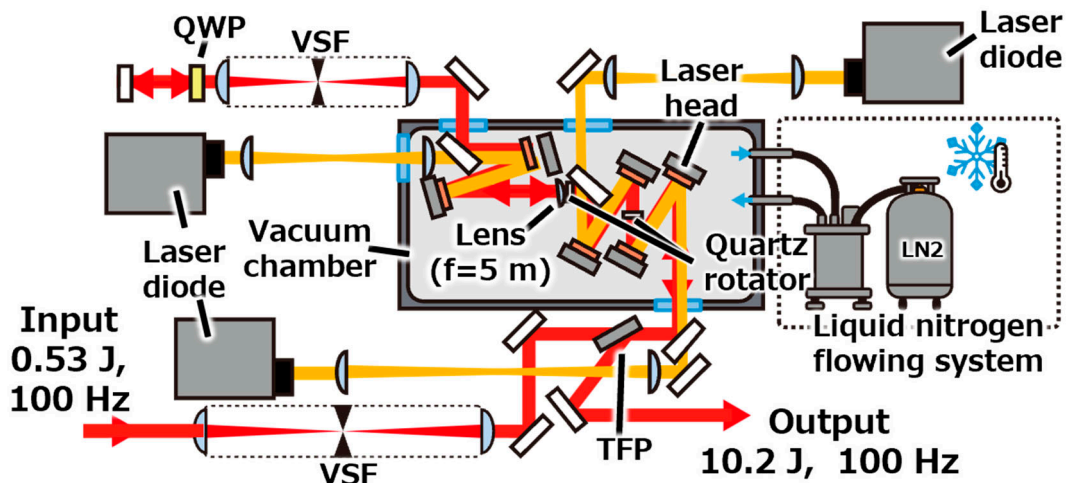


図 3 SENJU-lite システムにおけるアクティブミラー方式による主増幅器の構成図 ^{8,9)}

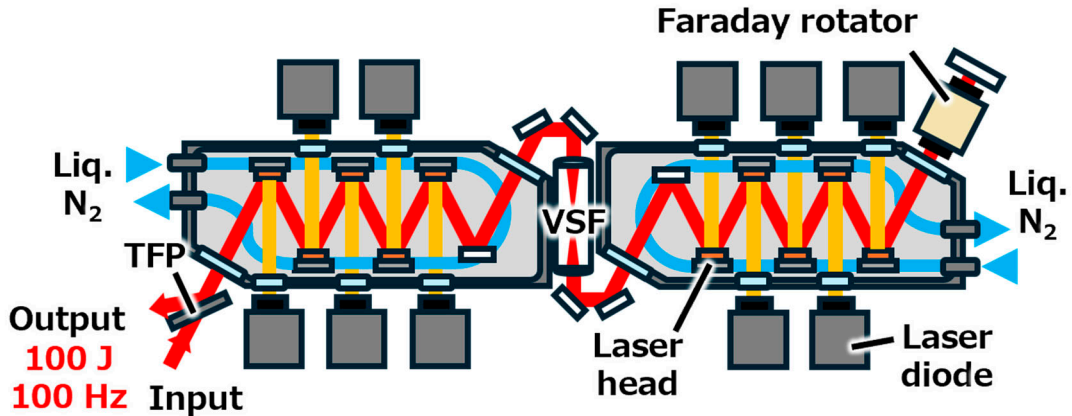


図4 10 cm 級アクティブミラー増幅方式による SENJU 主増幅器

低温冷却アクティブミラー増幅器は、必要に応じて複数枚を直列に配置し、多段増幅器として構成することも可能である。次章以降では、上述の 5 cm 級アクティブミラー増幅器 6 台を直列配置した 10 J/100 Hz (平均出力 1 kW) の SENJU-lite^{8,9)} システムについて述べる。

4. 10 J/100 Hz モジュール SENJU-lite

SENJU-lite^{8,9)} は、前章の基幹技術の有効性を実証することを目的として、SENJU のスケールダウンモデルとして開発された。本システムは、フロントエンド、低温冷却 Yb:YAG 再生増幅器、マルチパス増幅器、そしてアクティブミラー方式による主増幅器 (図 3) の 4 つから構成される。フロントエンドでは単一縦モードファイバー発振器を用い、EO パルススライサーによってパルス幅 10 ns、繰り返し 100 Hz のシード光 (種光) を生成する。このシード光は、再生増幅器で mJ 級まで増幅された後、マルチパス増幅器により約 1 J までエネルギーを増幅する。主増幅器は、6 台の 5 cm 級アクティブミラーヘッドから成る。セラミックディスクの Yb³⁺ 添加濃度は 0.5-1 at.% の範囲で各ヘッドごとに調整されている。Yb:YAG 周囲に接合された Cr⁴⁺ 添加エッジクラッドは冷却ジャケットによって冷却した。励起には波長 940 nm のレーザーダイオードを用い、1 台の半導体レーザーで 2 枚のディスクを同時に励起する構成とした。入力されたレーザーパルスは、6 台のアクティブミラーを順に通過した後、λ/4 波長板とエンドミラーで折り返され、再び 6 台のアクティブミラーを逆向きに通過する合計 12 パス構成で増幅される。総励起エネルギー 41.6 J、フロントエンドからの入力エネルギー 530 mJ の条件において、パルスエネルギー 10.2 J (平均出力 1.02 kW) を達成し、光-光変換効率 23.6 % を得た。出力エネルギーの安定性は 0.7 % (rms) に抑えられており、100 Hz の高繰り返し条件下での安定運転が可能であることを実証した。

これらの成果は、平均出力 1 kW を実証した初めての例として重要である。その後、1 章で紹介したラザフォードおよび HiLASE グループが、低温ヘリウムガス冷却に

よるマルチスラブ方式を用いて 10 J・100 Hz (1 kW)¹⁰⁾ の運転に成功しており、この分野の国際的な開発競争はさらに激しさを増している。

5. 100 J/100 Hz モジュール SENJU

アクティブミラー方式の利点として、セラミックの単位面積当たりの排熱能力を同程度となるよう設計することで、セラミックの口径をスケールアップすることが可能である点が挙げられる。直径 5 cm 級のアクティブミラー増幅器の開発で得られた知見を活かして、パワー拡大則を実証するために、現在、120 mm 角大口径 Yb:YAG + Cr:YAG セラミックディスクを使用した直径 10 cm 級のアクティブミラー増幅器多段増幅システム SENJU を開発している。

SENJU システムの構成図を図 4 に示す。先述の直径 5 cm 級のアクティブミラー増幅器多段増幅システム (図 3) からの出力光を角型 90 mm のビームサイズに拡大し、SENJU システムに入射する。10 cm 級アクティブミラー増幅器のレーザーヘッドは液体窒素循環装置によって 78 K まで冷却され、各ヘッドはピーク出力 50 kW の半導体レーザーにより個別に励起される。入力されたレーザーパルスは 10 台のアクティブミラーを順に通過した後、λ/4 波長板とエンドミラーで折り返され、再び 10 台のアクティブミラーを逆向きに通過する合計 20 パス構成で増幅される。合計の励起エネルギー 400 J に対して 100 J のレーザー出力を想定している。

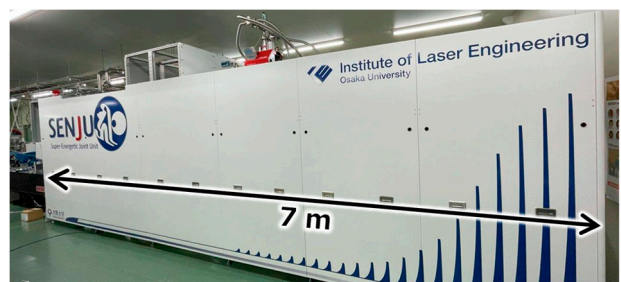


図5 SENJU モジュールの外観

これまでに、本開発の核心である 120 mm 角の大口径 Yb:YAG セラミクスレーザーヘッドの接合に成功し、単体で増幅性能評価を実施し、設計通りの小信号利得を実測することが出来た。また、冷却時における波面を計測し、波面ひずみは極めて小さく、内部応力を主な原因とする偏光解消損失を十分に抑制できることを確認した。SENJU システムの外観を図 5 に示す。全長は約 7 m となっており、大型トラックで輸送できるサイズである。

6. 展望

SENJU は、大エネルギー動作と高繰り返し運転という両立が困難であった要件を同時に満たすことで、高平均出力を有する新しいパワーレーザーの実現を目指できる。さらに本システムは、パワーレーザーとしては初めてモジュール化の概念を導入した点に大きな特徴がある。すなわち、従来のパワーレーザー装置は、特定目的に最適化された単一仕様の「一品物」として設計され、出力性能を段階的に増強することや量産的展開は想定されていなかった。一方、SENJU ではモジュール数を調整することで、要求に応じた出力エネルギーを設計でき、多様な研究分野や幅広いユーザー層のニーズに応えることが可能となる。

大阪大学レーザー科学研究所では、この特性を基盤とした将来構想として「J-EPoCH (Japan Establishment for a Power-laser Community Harvest)」を提案している。本構想では、100 J・100 Hz 級の SENJU モジュールを複数統合することで、1 kJ 級からさらに 10 kJ 級へと拡張し、最終的にはメガワット級に達する世界的にも例のない超高平均出力レーザーシステムの構築を計画している。なお、本計画は文部科学省による大型研究計画ロードマップ 2023 にも採択されている。

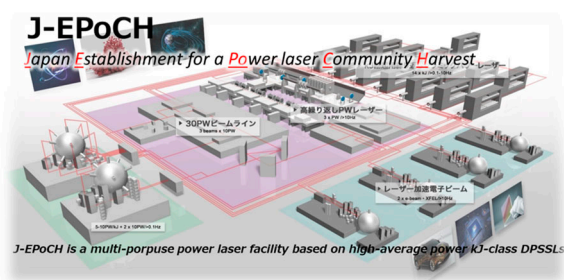


図 6 次代多目的大型複合レーザー施設：
J-EPoCH 概念図

本レーザーシステムが切り拓く応用領域は極めて広い。これまで単発照射実験により実証されてきた超高压状態の生成や、高エネルギー電子・イオン・中性子などの粒子発生を、高繰り返し条件下で実現できれば、レーザー駆動型粒子加速器や X 線自由電子レーザーの実用化が大きく前進すると期待される。大型加速器施設に依存しない小型高性能量子ビーム源は、基礎科学のみならず医療や産業分

野への波及効果も大きい。

レーザー核融合研究においても、高平均出力レーザーの導入は研究手法そのものを変革する可能性を持つ。従来の単発実験では取得データ数が限られ、AI の活用は主として事後解析にとどまっていた¹¹⁾。しかし高繰り返し実験が可能となれば、膨大なデータをリアルタイムで取得・解析し、結果を即座に照射条件へ反映する「サイバーフィジカルシステム」の構築が現実的となる。これにより、核融合反応効率の飛躍的向上を含む新たな研究展開が期待される。

加えて、本レーザー技術は宇宙環境分野にも応用が提案されている。地上から小型宇宙デブリを精密に照射し軌道から除去する能動的デブリ除去ミッション¹²⁾への展開も検討されており、その技術的インパクトは宇宙環境保全にまで及ぶと考えられる。

謝辞

本研究の一部は JST 未来社会創造事業 (JPMJMI17A) の支援を受けた。SENJU 開発チームの荻野純平氏、椿本孝治氏、吉田英次氏、田丸裕基氏、藤岡加奈氏、松尾悟志氏、兒玉了祐氏 (大阪大学)、時田茂樹氏 (京都大学)、河端宏治氏 (レーザー技術推進センター)、本越伸二氏、宮永憲明氏 (レーザー技術総合研究所)、松尾秀昭氏 (NAT)、植田憲一氏 (電気通信大学) に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) K. Katagiri, T. Pikuz, L. Fang, B. Albertazzi, S. Egashira, Y. Inubushi, G. Kamimura, R. Kodama, M. Koenig, B. Koziolowski et al., *Science* 382, 69 (2023).
- 2) Z. Lan, Y. Arikawa, S. R. Mirfayzi, A. Morace, T. Hayakawa, H. Sato, T. Kamiyama, T. Wei, Y. Tatsumi, M. Koizumi, et al., *Nat. Commun.* 15, 5365 (2024).
- 3) A. B. Zylstra, O. A. Hurricane, D. A. Callahan, A. L. Kritcher, J. E. Ralph, H. F. Robey, J. S. Ross, C. V. Young, K. L. Baker, D. T. Casey et al., *Nature* 601, 542 (2022).
- 4) J. H. Campbell, J. S. Hayden, and A. Marker, *Int. J. Appl. Glass Sci.* 2, 3 (2011).
- 5) M. Divoký, J. Pilař, M. Hanuš, P. Navrátil, O. Denk, P. Severová, P. Mason, T. Butcher, S. Banerjee, M. De Vido, et al., *Opt. Lett.* 46, 5771 (2021).
- 6) T. Sekine, T. Kurita, Y. Hatano, Y. Muramatsu, M. Kurata, T. Morita, T. Watari, T. Iguchi, R. Yoshimura, Y. Tamaoki, et al., *Opt. Express* 30, 44385 (2022).
- 7) <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000043.000081184.html>
- 8) J. Ogino, S. Tokita, S. Kitajima, H. Yoshida, Z. Li, S.

- Motokoshi, N. Morio, K. Tsubakimoto, K. Fujioka, R. Kodama, et al., *Opt. Lett.* 46, 621 (2021).
- 9) J. Ogino, S. Tokita, S. Kitajima, H. Yoshida, Z. Li, S. Motokoshi, N. Morio, K. Tsubakimoto, K. Fujioka, R. Kodama, et al., *Opt. Continuum* 1, 1270 (2022).
- 10) M. De Vido, G. Quinn, D. Clarke, L. McHugh, P. Mason, J. Spear, J. M. Smith, M. Divoky, J. Pilar, O. Denk, et al., *Opt. Express* 32, 11907 (2024).
- 11) B. K. Spears, S., D. T. Casey, J. E. Field, J. A. Gaffney, K. D. Humbird, A. L. Kritcher, M. K. G. Kruse, Eugene Kur et al., *Science* 389,727 (2025).
- 12) 椿本孝治, 弘中陽一郎, 荻野純平, 重森啓介, 宮永憲明, 兒玉了祐: *レーザー研究* 52, 656 (2024).