

平成30年度防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

成果報告書

「ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザ」

令和元年5月

機関名 公益財団法人レーザー技術総合研究所

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、公益財団法人レーザー技術総合研究所が実施した平成30年度「ゼロフォノンライン励起新型高出力Yb:YAGセラミックレーザー」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

1.0 委託業務の目的

本委託業務では、Yb:YAG セラミックレーザーの 100℃以下での高効率室温動作を目指し、レーザー媒質内における発熱の低減を可能とするゼロフォノンライン励起(969nm 励起)技術を開発し、噴流衝突方式を用いた冷却技術を開発する。これらを組み合わせたレーザーシステムを構築し、レーザー発振総合試験により、室温動作する 1kW の高出力レーザーの技術実証を行う。

① ゼロフォノンライン励起技術の開発

Yb 濃度及び厚みを変えた 3 種類の Yb:YAG レーザー媒質、低出力 940nm 励起光源及びプール方式による水冷の冷却装置を組み合わせてレーザーシステムを構築し、温度上昇効果が発生しない短時間試験でレーザー発振特性を評価する。この試験結果から、ゼロフォノンライン励起(969nm 励起)に適用可能な、励起光密度と出力光密度の関係を示した出力予測モデルを作成する。

次に、Yb:YAG セラミックレーザー媒質、低出力ゼロフォノンライン励起光源(969nm)及び②で製作した冷却装置によりレーザーシステムを構築し、レーザー発振特性試験を実施する。出力予測モデルと得られた低出力ゼロフォノンライン励起(969nm 励起)の結果を比較し、出力予測モデルの最適化を行う。

最適化した出力予測モデルを用いて、適切な Yb の濃度及び厚みを選定し、③のレーザー発振総合試験で用いる Yb:YAG レーザー媒質を作製する。

② 冷却装置の設計・製作

冷却装置は、高い冷却性能が見込める衝突噴流方式を用いる。冷却媒体、圧力、装置のノズル形状などを検討し、装置の設計・製作を行う。製作した冷却装置は、①のレーザーシステムに組み込み、得られた試験結果をもとに、1kW/cm² の冷却性能となるように装置の冷媒流量等の改良を行う。改良した冷却装置は、③のレーザー発振総合試験で用いる。

③ レーザー発振総合試験

①の出力予測モデルを用いて製作したレーザー媒質、②で改良した冷却装置、高出力 940nm 励起光源を組み合わせて 1kW の出力を有するレーザーシステムを構築し、レーザー発振総合試験を実施し、レーザー発振特性、レーザー媒質の発熱特性を評価する。高出力 940nm 励起光源を用いて測定したデータを①で構築した出力予測モデルに適用することで、出力予測モデルを最適化する。最適化した出力予測モデルから、ゼロフォノンライン励起(969nm 励起)による 10kW 級のレーザー出力の実現に向けた基礎的な知見を得る。

これらを実現するために、レーザー技術総合研究所ではゼロフォノンライン励起に関わる技術開発及びプロジェクトの総合的推進、三菱重工業株式会社では高性能冷却に関わる研究を実施する。

1.1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

① ゼロフォノンライン励起技術の開発

平成28年度は、レーザー発振に関わる因子の温度依存性を取り入れた出力予測モデルを作成すると共に、940nm 励起でのプール水冷によるレーザー発振特性試験を行い、室温から 80℃までのレーザー発振出力の温度特性を計測した。さらに、作成したモデルにより実験結果の分析が可能であることを示した。このモデルを用いてゼロフォノン励起時の発振条件の検討を行った。

平成29年度は、低出力ゼロフォノンライン (969nm) 励起光源を用いて Yb:YAG TRAM のレーザー発振試験を行い、その出力特性について検討した。取得した実験値を昨年度作成した出力予測モデルにより解析し、作成した出力モデルがゼロフォノンライン励起時のレーザー特性の解析に有用であることを示した。また 940nm 励起条件との比較を行い、同じ吸収パワーでも発熱が少ないゼロフォノンライン励起の方がレーザー媒質の温度上昇が抑制され、出力がより増加することを実験的に示した。さらに、試作冷却装置を用いてゼロフォノンライン励起条件でのレーザー発振試験を実施した。噴流速度や冷媒温度のレーザー出力特性への効果について検討すると共に、レーザー媒質の Yb 濃度、層厚の効果についても検討した。Yb 濃度、層厚が異なる 4 種の TRAM を用いた発振試験によりレーザー特性の最も高い媒質を Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM に選定し、この媒質を用いて 100W 以上の安定な発振出力 (最大出力 183W) を得ることに成功した。

平成30年度は、レーザー発振総合試験に用いる媒質に選定した、Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM について、2016 年度に構築した出力予測モデルを用いて kW 級高出力スケールリングを行った。その結果、励起面積を拡張した条件では、励起吸収パワーを約 2kW とすることで 1kW の出力が得られる可能性があることがわかった。

レーザー発振総合試験により得られた kW 出力のレーザー特性に基づき、出力予測モデルを用いて 10kW 出力のためのスケールリングを行った。その結果、励起ビーム径を ϕ 2cm、吸収パワー 25kW で 10kW を越える出力が得られると予測された。多段励起方式を用いることで、10kW の出力に必要な入力値は 30kW まで低下させることが可能となる。940nm 励起と同じ条件で励起をゼロフォノンラインに変更した場合の出力特性を計算した結果 10kW の高出力条件においてもゼロフォノンライン励起の方が出力特性に有利に働くものと予測された。

② 冷却装置の設計・製作

高い冷却性能が見込める衝突噴流方式を用いて設計・製作した冷却装置は、研究目標であった $1\text{kW}/\text{cm}^2$ の冷却性能、及びレーザー発振総合試験への適用について、いずれも達成した。以降に年度毎の成果をまとめる。

平成28年度は、冷却装置の冷却性能が $1\text{kW}/\text{cm}^2$ となるよう冷却媒体、圧力、装置のノズル形状などを検討した。検討結果をもとに限界熱流束を評価し、 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ の冷却性能を達成できる見込みを得た。

平成29年度は、冷却装置を製作し冷却性能を確認するため、模擬発熱体を用いた冷却性能評価試験を行った。判定基準は熱流束 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ において表面温度が 150°C 以下であることとし、衝突噴流冷却の特性を踏まえた検証ポイントとして、(1)冷却面の中央部と端部の冷却能力の比較、(2)噴流速度と冷媒温度の冷却能力への影響、(3)対流伝熱と沸騰伝熱の効果の3点も評価した。その結果、標準条件（噴流速度 $4.5\text{m}/\text{s}$ 、冷媒温度 22.2°C ）では、模擬発熱体中央部が 142.6°C 、端部が 146.4°C となり、 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ の冷却性能を有することを確認した。

平成30年度は、平成29年度で得られた試験結果をもとに、冷却装置の改良を行った。試験では噴流速度を $17\text{m}/\text{s}$ とした場合、噴流衝突面に液溜りが発生することによる噴流の乱れが生じたため、衝突面周囲の排水性向上を目的としたホルダ形状の改良を行った。平成29年度と同じ方法で冷却性能評価試験を行った結果、改良前のホルダと比較すると冷却面温度は約 12°C 低いことが確認できた（冷却条件：噴流速度 $17\text{m}/\text{s}$ 、冷媒温度 常温）。課題であった噴流の乱れが改善されたことにより、レーザー発振総合試験において $17\text{m}/\text{s}$ 以上の高噴流速度領域を適用することが可能となった。

また、さらなる高出力化（ 10kW 級レーザー）の実現に向け、3種類のレーザー発振方式に対し、それぞれの冷却装置の主要緒元（噴流速度等）について検討した。その結果、3種類の内最も小型化が可能な方式については市販品による構成が可能なことを確認した。さらに、励起光入力増加により媒質の発熱量も増加するため、発熱による応力で媒質が破損する恐れがあることから、熱応力解析を行った。解析結果から、最大主応力は 1kW 級レーザー発振試験時の条件よりも、相対的に小さいと予測されることが分かった。1つの要因として、励起光源のフラットトップ性があると考えられる。 10kW レーザー発振条件での熱応力解析では、よりフラットトップに近い条件（過去の三菱重工業(株)社内試験に基づく）を用いたが、 1kW レーザー発振総合試験ではガウシアンビームに近い状態であったため、最大主応力が大きくなったと考えられる。

③ レーザー発振総合試験

レーザー発振総合試験に用いるレーザー媒質の低い光吸収率を補償するため、新たに多段励起方式を導入し、2段励起光学系を構築してレーザー発振試験を行った。その

結果、1.8 kW 励起時で比較すると、2 段励起の方が出力は約 1.5 倍増加することが明らかとなり、高出力化に対する多段励起方式の有用性が検証された。

1kW を越える出力を実証するため、Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM を用い、4 段励起方式によるレーザー発振総合試験を行った。その結果、最大 1.07kW を出力し、1kW を越える出力が実証された。スロープ効率は 60% であり、冷却性能が向上したことにより高励起条件においても高い発振効率が保持できた。多段励起により媒質の光吸収率を高めることが可能となったことから、当初の計画にはなかった Yb 濃度 9.8%-層厚 0.2mmTRAM を用いてレーザー発振試験を行った。その結果、最大で 1.03kW の出力が得られ、2 種の媒質で 1kW を越える出力が実証された。

1. 2 研究課題終了後の将来性

将来の高出力化に向けて、本研究成果に基づき 10kW 級レーザーの実現に必要な冷却システムの検討を行った。レーザーの発振方式によっては、追加の光学系や複数の媒質とノズルが必要になるものの、励起部領域は 1kW 級レーザーのノズルの噴流冷却領域で対応可能であるため、媒質やノズルは流用することができる。また、その他の機器においては市販品で構成することが可能であり、10kW 級レーザーへの適用は十分可能であると考えている。

1. 3 副次的成果や目標を超える成果

(1) 1kW/cm²を超える冷却性能を達成

研究目標は 1kW/cm² の冷却性能であったが、標準条件(噴流速度 5m/s、冷媒温度 20.6°C) のとき、最大で 1.37kW/cm² の冷却性能を達成した(図 2.3.2.6-5 を参照)。さらに、本冷却装置で得られた最大冷却性能条件(噴流速度 24m/s、冷媒温度 7.3°C) では、熱流束 1kW/cm² の条件で標準条件時より表面温度を下げることもできたことから、1.37kW/cm² を超える冷却性能を達成できると考えられる。

(2) ホルダ改良による冷却性能向上

噴流衝突面に液溜りが発生することによる噴流の乱れを解消するため、ホルダ形状を改良した結果、改良前のホルダと比較すると(冷却条件は同じ)、冷却面温度は約 12°C 低いことが確認でき、冷却性能が向上した。これは、改良によって衝突面周囲の排水性が向上したことで、噴流は液溜りに妨げられることなく冷却することができ、冷却性能が向上したものと考えられる。また、改良の効果によって、ポンプの性能限界である噴流速度 24m/s での運用が可能となり、冷媒温度を常温とした条件では、冷却面温度は 98.4°C まで低下させることができた。

(3) 冷媒温度の低温化による冷却面温度の低下

冷却条件である噴流速度と冷媒温度の内、(2)で述べたとおり噴流速度は上限値まで行うことができたため、冷媒温度を可能な限り下げた条件での冷却性能の評価を行った。その結果、冷媒温度を約7°Cまで下げた場合（噴流速度は24m/s）、冷却面温度は77.6°Cまで低下させることができた。これは本冷却装置で得られた最大冷却性能条件である。

1. 4 論文、特許、学会発表等の研究の成果

レーザー技術総合研究所、三菱重工業との共同研究として、応用物理学会、レーザー学会などレーザー関連の議論が活発な国内学会に参加、発表を行ったほか、下記に示すような、光技術関連の国際学会で研究報告を行った。

- (1) 藤田 雅之 ら、ゼロフォノンライン励起 Yb:YAG TRAM レーザーの熱特性、レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会
- (2) Masayuki Fujita et al., “Zero-phonon line pumped Yb:YAG TRAM laser oscillator with direct jet impingement cooling,” Proc. SPIE 10896, Solid State Lasers XXVIII: Technology and Devices, 108961Z (7 March 2019);
他

1. 5 研究実施体制とマネジメント

本研究設備は代表研究機関の所有する場所に設置している。冷却装置の冷却性能評価試験など分担研究機関が主体となって行う作業を計画していたため、本研究に係る代表研究機関の作業ならびに本研究以外の作業を妨げないよう、代表研究機関と連絡を密に行い、本研究を円滑に行った。また、研究の進捗については、研究開発連絡会での報告を定期的に行い成果の共有を図った。

1. 6 経費の効率的執行

原則として機材の購入においては相見積を取得のうえ、最安値の業者と契約した。また試験実施期間を考慮し、レンタル品で対応することが可能な機材は、それらを用いることで研究費を効率的に使用した。試験の実施においては、社有設備（高出力励起光源）を利用し、経費の低減を図った。

2. 平成30年度（報告年度）の実施内容

2.1 平成30年度の実施計画

①（実施項目1）ゼロフォノンライン励起技術の開発

現有的高出力励起光源（出力2kW、波長940nm）を用いたkW級レーザー発振実験に向けて、レーザー本体部に必要な改良点を検討し、最適設計作業を進める。改良されたレーザー本体と冷却部を合体させ、kW級出力を目指したレーザー発振総合試験において高効率室温動作実験を行う。前年度に構築した出力予想モデルと前年度に4種類のYb:YAGレーザーを用いて行った試験結果に基づき最大出力が期待されるレーザー媒質のYb濃度及び厚みを選定し、励起面積0.2cm²以上でレーザー発振試験を行う。レーザー発振特性（発振しきい値、スロープ効率）及びレーザー媒質の発熱特性を評価し、励起強度4kW/cm²までの出力スケールリング則を実証する。実証された出力スケールリング則と前年度に得られたゼロフォノンライン励起実験結果を基に、高出力時のゼロフォノンライン励起の有効性を明らかにして、さらなる高出力化（10kW級のレーザー）の可能性と拡張性を検討する。

また、分担研究機関と連携し、再委託によって、以下の②の研究開発に取り組む。

②（実施項目2）冷却装置の試作（再委託先：三菱重工業株式会社）

2018年度は、2017年度に試作した衝突噴流方式の冷却装置について改良を行い、レーザー発振総合試験で用いる。2017年度に実施の冷却性能評価試験等で得たデータに基づき検討した冷却条件について、レーザー発振総合試験において噴流速度17m/s以上での適用を目標に、冷却系統各部の見直し、改良を必要に応じて実施する。また、さらなる高出力化（10kW級のレーザー）の実現に向けた基礎的な知見を得るため、10kW級レーザーに必要な冷却系統の主要諸元（噴流速度等）についても検討を行う。

③ プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、研究開発連絡会や技術検討会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたる。

本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努める。なお、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知する。

2.2 平成30年度の研究実施日程

平成30年度（2018年度）の研究実施日程を以下に示す。

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①ゼロフォノン ライン励起技術 の開発	← レーザー本体部の改良 →				← レーザー発振総合試験 →							
	← 出カスケーリング則の最適化 →				← レーザー発振特性の評価 →							
					← レーザー高出力化検討 →							
					← レーザー媒質発熱特性評価 →							
											← まとめ →	
②冷却装置の 試作	← 装置改良(設計・製造・設置) →											
					← 冷却性能検証 →				← 解析 →			
					← 高出力化対応検討 →				← レーザー発振試験 (レーザー技術総合研究所) →			
											← まとめ →	
③プロジェクト の総合的推進	← →											

2.3 平成30年度の研究成果の説明

2.3.1 ゼロフォノンライン励起技術の開発

2.3.1.1 概要

2018年度（平成30年度）は、2017年度に最大600W出力のゼロフォノンライン（ZPL）励起光源を用いたレーザー発振試験の結果からレーザー媒質（Yb：濃度5at%-層厚0.6mmTRAM）を選定し、励起面積0.2cm²以上の条件でkW級高出力スケールリングを行った。kW級出力を得るためのレーザー本体部の改良を行い、現有の高出力励起光源（出力2kW、波長940nm）、および冷却性能を改良した水噴流冷却装置（2.3.2章を参照）を合体させてレーザー発振総合試験を行った。その結果、1kWを越えるレーザー出力を実証した。

また、高出力時のレーザー発振特性（発振しきい値、スロープ効率）及びレーザー媒質の発熱（温度）特性を評価した。2017年度までに構築した発振出力モデルを用いてゼロフォノンライン励起による10kW級のレーザー出力スケールリングを行い、さらなる高出力化の可能性と拡張性について検討した。

2018年度の研究の流れを図2.3.1.1-1に示す。

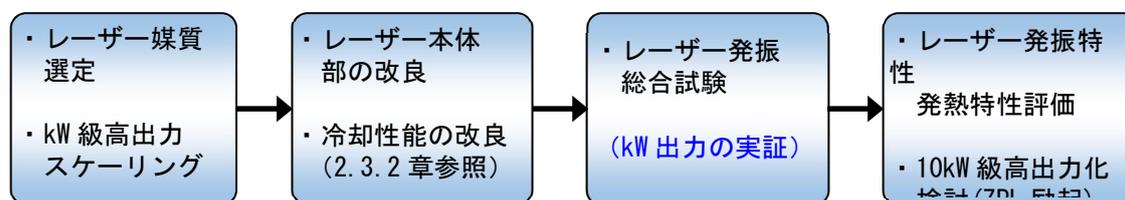


図 2.3.1.1-1 研究の流れ

2.3.1.2 レーザー媒質の選定と kW 級高出力スケールリング

2.3.1.2.1 レーザー媒質の選定

2017年度に噴流冷却およびゼロフォノンライン（ZPL）励起光源を用いたレーザー発振試験を実施し、4種のレーザー媒質（Yb濃度5at%-層厚0.6mmTRAM、Yb濃度5at%-層厚0.9mmTRAM、濃度9.8at%-層厚0.4mmTRAM、Yb濃度9.8at%-層厚0.6mmTRAM）のレーザー発振特性を比較した。図2.3.1.2.1.1-1に、吸収パワーに対する各媒質のレーザー出力特性を示す。ZPL励起光源の出力は最大で600Wであることから、励起光強度を大きくするため励起面積は0.053cm²（励起ビーム径φ2.3mm）とした。冷却条件は噴流速度17m/s、冷却水温度19℃である。吸収パワーは媒質温度の計測値と、Yb濃度、層厚を

考慮した Yb:YAG の光吸収率の温度依存性から算出した。吸収パワーに対する出力特性が最も高い媒質は、発振しきい値が最も低く、且つスロープ効率が高い Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM である。この結果から、kW 級レーザー発振総合試験に用いるレーザー媒質として Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM を選定した。

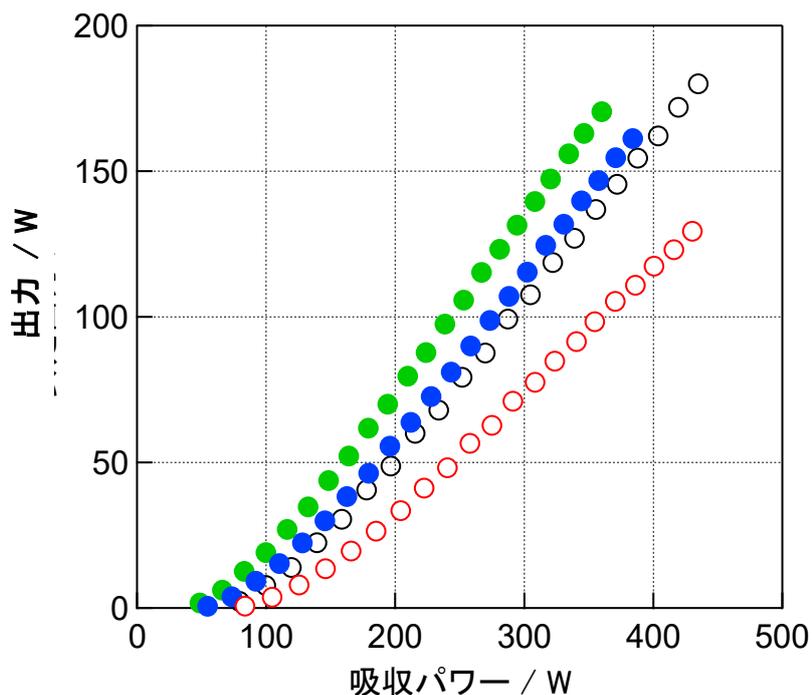


図 2.3.1.2.1-1 (●) Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM、(○) Yb 濃度 5at%-層厚 0.9mmTRAM、
(●) Yb 濃度 9.8at%-層厚 0.4mmTRAM、(○) Yb 濃度 9.8at%-層厚 0.6mmTRAM におけるレーザー出力特性

2.3.1.2.2 kW 級高出力スケーリング

選定した Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM について、2016 年度に構築した出力予測モデルを用いて kW 級高出力スケーリングを行った。まず、ゼロフォノンライン励起レーザー発振試験により得られた出力特性（図 2.3.1.2.1-1 を参照）を、出力予測モデルにより解析した。モデル式の概要を下記に示す。発振出力は一般に、出力 P_{out} ($=AI_{out}$ 、 A : ビーム面積、 I_{out} : 出力密度)、吸収パワー P_{abs} 、発振しきい値 P_{th} 、スロープ効率 η_{slope} を用いて式(1)で示され、Yb : YAG の物性値および光共振器の光学パラメータを用いると式(2)のように表わされる。

$$P_{out} = AI_{out} = \eta_{slope} (P_{abs} - P_{th}) \quad (1)$$

$$P_{out} = AI_{out} = \eta_{slope} \left(\frac{V}{\left(\frac{(f_l + f_u) \sigma_{emi} \tau_f}{h\nu_p} \right)} \right) (g_0 - g_{th}) \quad (2)$$

ここで g_0 : 小信号利得、 g_{th} : 発振閾値での小信号利得、 f_l : レーザー上準位占有率、 f_u : レーザー下準位占有率、 σ_{emi} : レーザー発振波長 (1030nm) での誘導放出断面積、 τ_f : 蛍光寿命、 $h\nu_p$: 励起光光子エネルギーである。 g_0 、 g_{th} 、 η_{slope} はそれぞれ、式(3)、(4)、(5)で与えられる。

$$g_0 = \frac{(f_l + f_u) \sigma_{emi} \tau_f}{h\nu_p} \frac{P_{abs}}{V} - f_l \sigma_{emi} N_0 \quad (3)$$

$$g_{th} = \frac{1}{2l} (2L_s - K) \quad (4)$$

$$\eta_{slope} = \frac{K}{K + L_s} \eta_Q \quad (5)$$

ここで N_0 : 原子数×ドープ濃度、 V : 励起体積、 l : 励起光路長、 η_Q : 励起量子効率、 L_s : 光学損失、 K : 出力結合鏡の透過率である。 P_{abs} は、励起光入力パワー P_{in} と Yb:YAG の吸収断面積 (σ_{abs}) を用いて式(8)で表わされる。

$$\begin{aligned}
V &= 4r^2 \pi d \left(\int_0^d \int_{z\sqrt{3}}^{2r} r \sqrt{1 - \frac{x^2}{4r^2}} dx dz \right) \\
&= 2r^2 \pi d - \frac{16}{9} r^3 \sqrt{3} - \frac{1}{9} (-3d^2 + 4r^2)^{3/2} + \frac{4}{3} r^2 \sqrt{3} \sqrt{-3d^2 + 4r^2} + 4r^2 \arcsin \left(\frac{1}{2} \frac{d\sqrt{3}}{r} \right) d \quad (6)
\end{aligned}$$

$$l = 4d \quad (7)$$

$$P_{abs} = P_{in} \{ (1 - \exp(-N_0 \sigma_{abs} l)) \} \quad (8)$$

レーザー発振出力に関与するこれらのパラメータの中で、媒質の温度に依存して変化する因子は $f_l, f_u, \sigma_{emi}, \sigma_{abs}, \tau_f$ である。これらの温度依存性を発振出力式 (式(2)) に導入するため以下の方法を用いた。 f_l, f_u については、Yb の励起状態 (${}^2F_{5/2}$) の3つのシュタルク準位、基底状態 (${}^2F_{7/2}$) の4つのシュタルク準位のエネルギー²⁾ を用い、各温度について Boltzmann 分布則により算出した。 $\sigma_{emi}, \sigma_{abs}$ については、Yb:YAG の温度依存性の実測値³⁾ から近似式を作成し、式(2)に導入した。 τ_f についても同様に蛍光寿命温度依存性の実測値^{4,5)} から式(2)に導入した。温度依存因子を導入し、発振出力が温度 (T) に依存するものとして式(2)を書き直すと、式(9)となる。

$$P_{out}(T) = A I_{out}(T) = \eta_{slope} \frac{V}{\left(\frac{(f_l(T) + f_u(T)) \sigma_{emi}(T) \tau_f(T)}{h\nu_p} \right)} (g_0(T) - g_{th}) \quad (9)$$

レーザー発振時の動作温度 (T) は、発振出力試験時に同時計測した励起中心部の媒質温度データを励起入力パワーに対してプロットし、近似式を作成することにより実験的に算出した (図 2.3.1.2.2-1 を参照)。図 2.3.1.2.2-2 に、出力予測モデルにより計算した出力特性と、実測値を比較したものを示す。横軸、縦軸は励起面積を考慮して出力強度、吸収強度にそれぞれ変換した。計算値は実測値をほぼ再現している。このことから、少なくとも吸収強度 $10\text{kW}/\text{cm}^2$ 以内の領域において出力の予測が可能になったと考えられる。

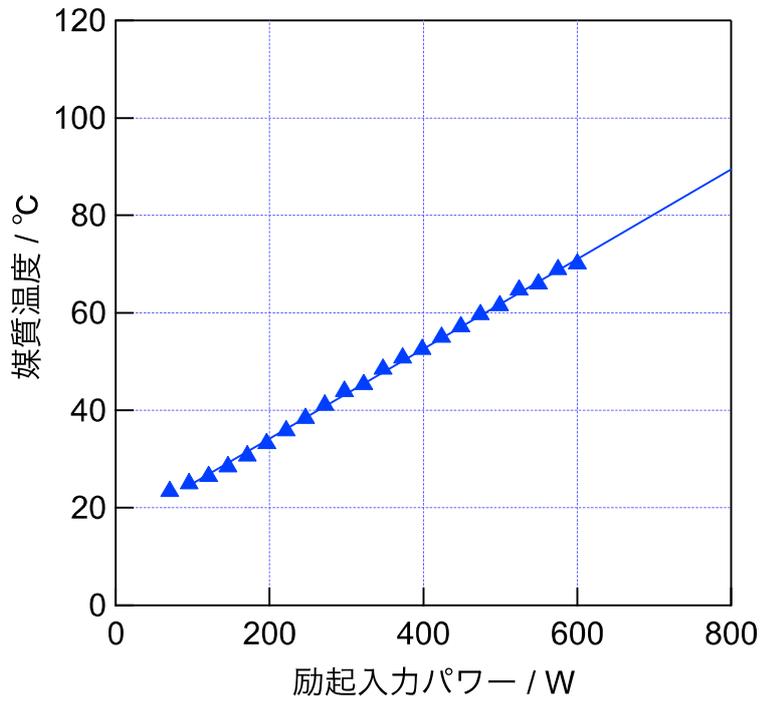


図 2.3.1.2.2-1 Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM の ZPL 励起レーザー発振時の励起入力パワーに対する媒質温度変化と線形近似直線

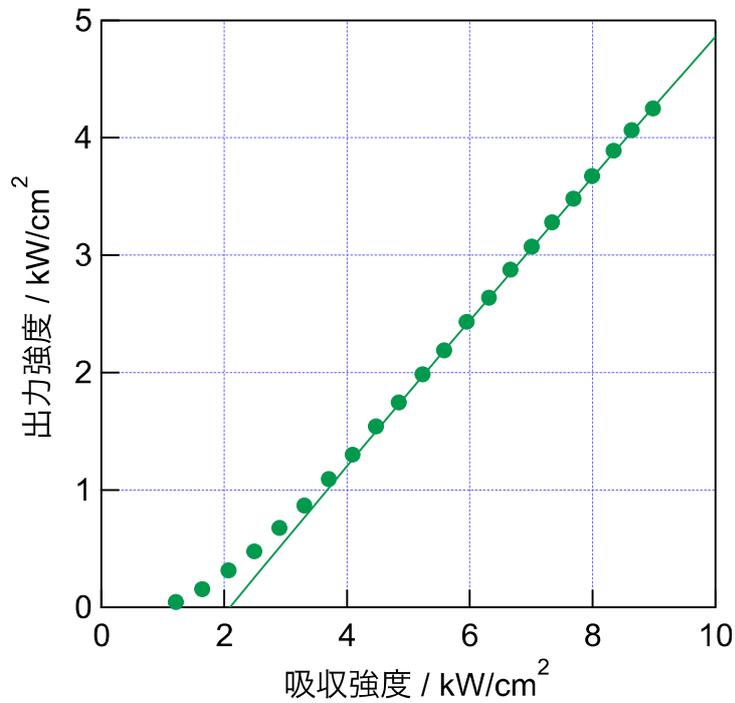


図 2.3.1.2.2-2 (●) Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM におけるゼロフォノンライン励起時の出力強度特性、(図中実線) 出力予測モデルによる計算値

出力予測モデルを用いた kW 級高出力スケーリングを行った。励起ビーム径（励起面積）を拡張して出力を計算し、kW 級出力を得るために必要な条件を予測した。励起面積を 0.2cm^2 以上とするため、励起ビーム径は $\phi 6\text{mm}$ (0.28cm^2) または $\phi 7\text{mm}$ (0.39cm^2) とした。高出力光源を用いた実証試験を行うため励起波長は 940nm とし、励起入力パワーに対する媒質温度の変化は、励起ビーム径の励起体積 (V) の変化に線形依存するものとして推定した。他のパラメータは変更を加えず、出力を計算した。図 2.3.1.2.2-3 に、吸収強度に対する出力強度を計算した結果を示す。吸収強度に対する出力強度は励起ビーム径に関わらず依存性は一致するが、計算によりこの点を確認できた。図 2.3.1.2.2-4 に、吸収強度、出力強度をそれぞれ励起吸収パワー、出力に変換したものを示す。ビーム径 $\phi 6\text{mm}$ の場合、発振しきい値は約 0.5kW 、スロープ効率は 57% で、吸収パワー約 2.2kW で 1kW の出力が得られると予測される。一方ビーム径 $\phi 7\text{mm}$ の場合にはスロープ効率は 57% と同一であるが、励起面積が増大するため発振しきい値は約 200W 増加し、 1kW 出力を得るためには約 2.4kW の吸収パワーを要する。これらの結果から、励起面積を拡張した条件では、励起吸収パワーを約 2kW とすることで 1kW の出力が得られる可能性があることがわかった。

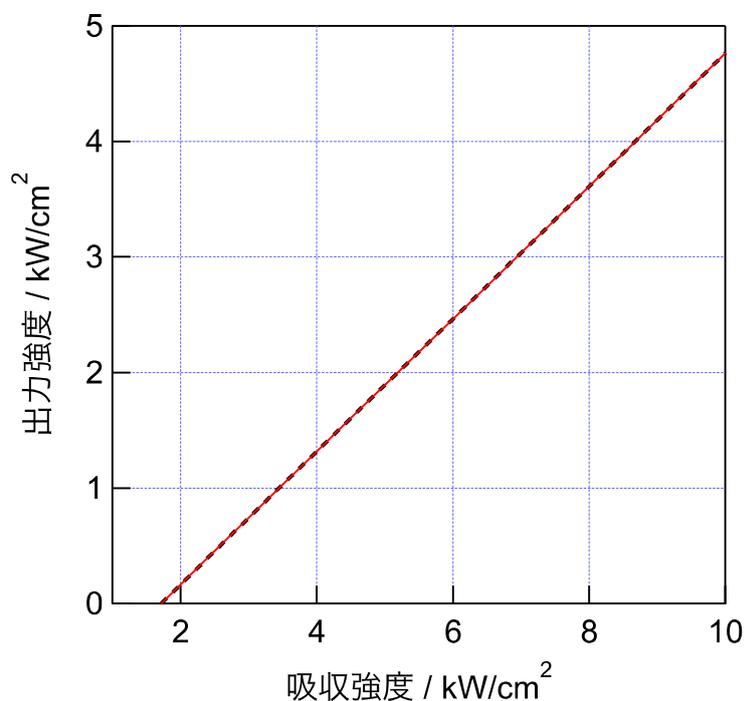


図 2.3.1.2.2-3 (赤実線) 励起ビーム径 $\phi 6\text{mm}$ 、(黒点線) 励起ビーム径 $\phi 7\text{mm}$ での出力強度特性 (940nm 励起条件)

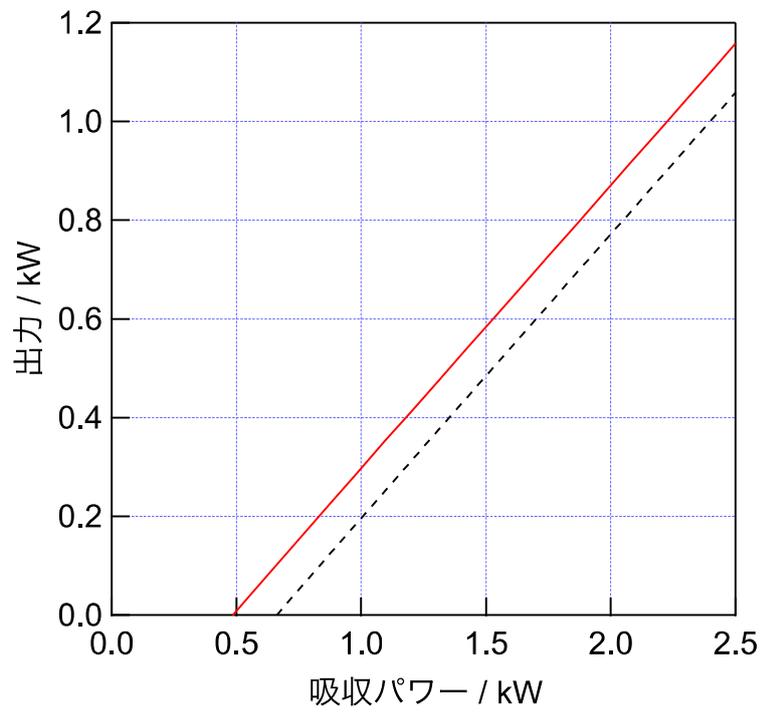


図 2.3.1.2.2-4 (赤実線) 励起ビーム径 ϕ 6mm、(黒点線) 励起ビーム径 ϕ 7mm での出力特性 (940nm 励起条件)

2.3.1.3 レーザー本体部の改良（多段励起方式の導入）

2.3.1.3.1 多段励起方式の導入

レーザー発振総合試験に用いるために選定した Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM は、吸収パワーに対するレーザー特性は最も高いが、一方で、Yb 濃度および層厚が薄いため、光吸収率が低いという課題がある。この対策として、新たに多段励起方式を導入し、レーザー本体部の改良を行った。多段励起では、1 段目の励起で媒質に吸収されなかった光を励起光として再度媒質に入力することにより、励起パワーに対する吸収パワーの比率を増加させる、あるいは励起パワーを実効的に増加させることが可能となる。図 2.3.1.3.1-1 に、励起波長 940nm（正確には 935nm）、励起パワーを一定として 1 段励起、2 段励起、3 段励起を行ったと仮定した場合の光吸収率の温度依存性を計算した結果を示す。1 段励起では光吸収率は常温でも約 0.5 であるが、2 段励起後には約 25%増加して 0.75、3 段励起後にはさらに 12.5%増加して約 0.9 の光吸収率が得られる。また 3 段励起では媒質温度が 150°Cまで増大しても、光吸収率は 0.85 以上を維持できる。表 2.3.1.3.1-1 には、2.36kW(高励起出力光源の最大出力)入力時に多段励起で得られる吸収パワー、および 1 段励起を仮定した場合の実効的な入力パワーを計算した結果を示す。3 段励起を用いると、媒質温度が 150°Cに増加しても 2kW 以上の吸収パワーが得られることがわかった。

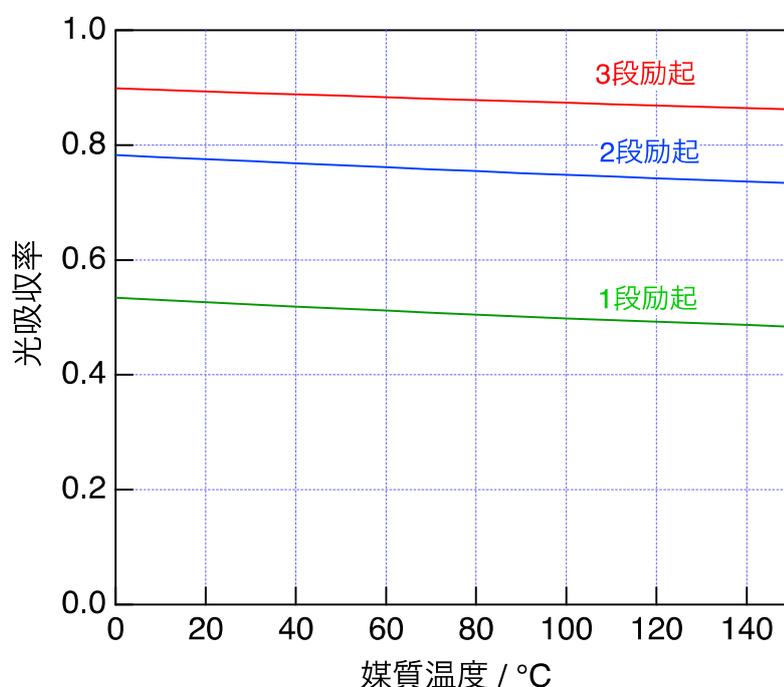


図 2.3.1.3.1-1 多段励起を用いた際の Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM の光吸収率の温度依存性

表 2.3.1.3.1-1 1～3 段励起による吸収パワーの温度変化

媒質温度 (°C)	入力 (kW)	吸収パワー (kW) (1 段励起時)	吸収パワー (kW) (2 段励起時)	吸収パワー (kW) (3 段励起時)	実効的な入力 * (kW)
20	2.36	1.24	1.83	2.10	4.01
50	2.36	1.21	1.80	2.09	4.05
100	2.36	1.17	1.76	2.06	4.13
150	2.36	1.14	1.73	2.03	4.20

*3 段励起時の吸収パワーを 1 段励起時のものと仮定して入力値を逆算した値

2.3.1.3.2 多段励起方式によるレーザー出力特性の検討

多段励起方式によるレーザー出力特性について検証するため、2段励起光学系を構築してレーザー発振試験を行った。図2.3.1.3.2-1に配置図を示す。媒質の冷却には、噴流冷却法を用いた。ここで使用した噴流水冷装置は、水噴流の排水性を高める改良を施した後のものである(2.3.2.2章を参照)。冷却条件は噴流速度 17m/s、水温 19°C (±1 °C) である。レーザー媒質には Yb 濃度 5at%-層厚 0.9mmTRAM を用いた。TRAM の近傍にダイクロミックミラー (DM0°)、結合出力ミラー (OC、反射率 95%) を配置し、共振器を作成した。励起光源には、現有のファイバー出力型高出力 LD (LE0247、浜松ホトニクス) を用いた。最大出力は 2.36kW、波長は 935nm である。励起光は TRAM の Yb 層上で結像するようにレンズで調整して入力した(1段励起)。1段目の励起で媒質に吸収されなかった光は、Yb 層の底面で全反射して TRAM の反対側から出射するが、この光を集光し、2枚のレンズを用いて像転送系を作成して1段目の励起とビーム径が同様にできるように調整し、再度媒質に入力した(2段励起)。励起ビーム径は φ7mm とした。また、分光器 (SP) により媒質の蛍光スペクトルを同時計測して励起中心部の温度を算出し、光吸収率の温度依存性から吸収パワーを求めた。1段励起の出力特性の計測は、2段目の励起光路にブロックを置いて励起光を遮った形で行い、励起以外の実験条件に変化がないようにした。

図2.3.1.3.2-2に、1段励起と2段励起時の吸収パワーに対するレーザー出力を比較したものを示す。入力パワーの最大は 1.8 kW である。多段励起化により変化するのは吸収パワーのみであり、出力特性(発振しきい値、スロープ効率)は両条件で同一となると予測されるが、実際に出力特性に変化がないことを確認した。また多段励起では、励起パワーが同じ場合でも吸収パワーが増加するため出力も増加する。1.8 kW 励起時と比較すると、2段励起の方が出力は約 1.5 倍増加することが明らかとなった。この結果から、高出力化に対する多段励起の有用性が検証できた。

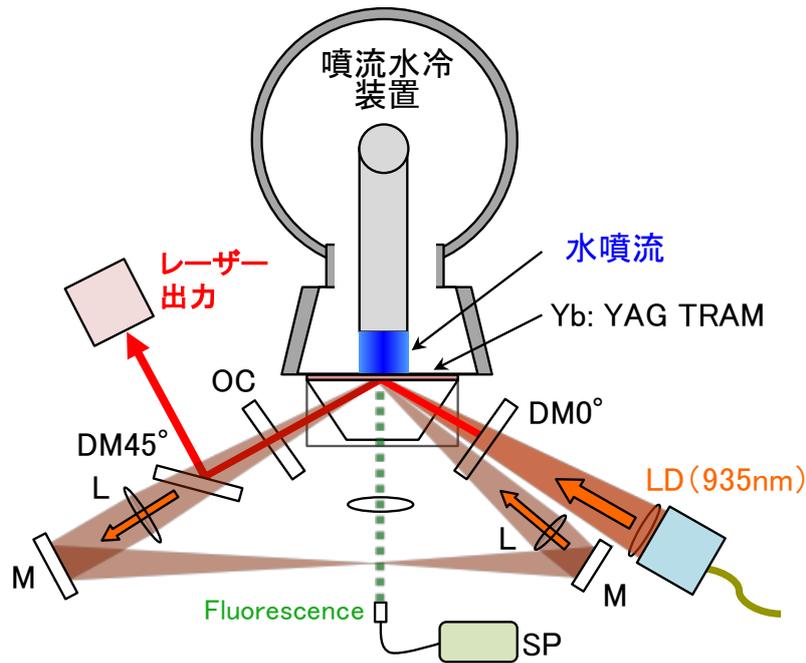


図 2.3.1.3.2-1 2 段階励起レーザー発振試験配置。

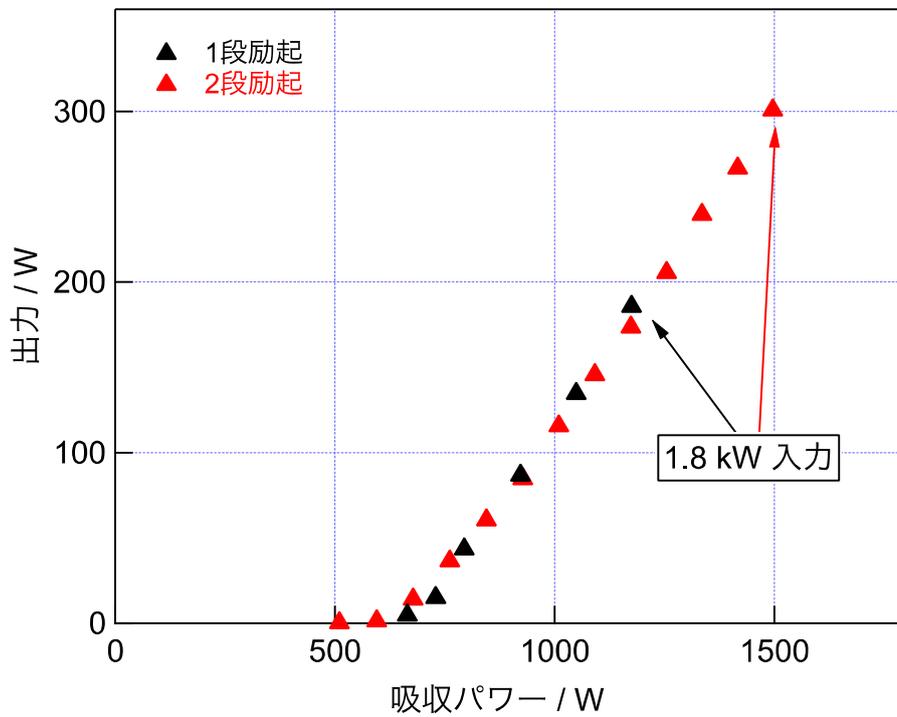


図 2.3.1.3.2-2 1 段階励起、2 段階励起によるレーザー出力特性の比較

多段励起によるレーザー出力増加が確認されたことから、選定した Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM を用いて、2 段励起によるレーザー発振試験を行った。試験条件、光学配置は図 2.3.1.3.2-1 と同様であるが、高出力化を目指して励起ビーム径を $\phi 7\text{mm}$ から $\phi 6\text{mm}$ に縮小し、入力を励起光源の最大値 (2.36kW) まで増加させた。また結合出力ミラー (OC) の反射率を 85%に変更し、スロープ効率の向上を目指した。冷却水温は 19 および 12 $^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) の 2 条件で行い、冷却性による出力特性の変化についても検討した。噴流速度は 17m/s で統一した。図 2.3.1.3.2-3 に出力特性を示す。水温 19 $^{\circ}\text{C}$ の時レーザー出力は 2.36kW の入力時に最大 720 W に達した。発振しきい値は 500W、スロープ効率は約 59 %であった。この結果は、2.3.1.2.2 章において予測した同一条件 (ビーム径 $\phi 6\text{mm}$) での出力特性と一致するものであり、出力予測モデルを用いることで kW 級スケールリングが可能であることが実験的にも示された。

冷却水温を 12 $^{\circ}\text{C}$ まで低下させると出力はさらに増加した (最大 750 W)。この結果は、2017 年度に明らかとした、高噴流速度 ($>17\text{m/s}$) での冷却は対流伝熱効果が大きくなるため、低水温で冷却することにより媒質をより低温状態に保持できるという結果と合致するものである。図 2.3.1.3.2-4 に、出力と同時計測した励起中心部の媒質温度を示す。同じ吸収パワーで比較すると、12 $^{\circ}\text{C}$ での媒質温度は 19 $^{\circ}\text{C}$ 冷却時に比べいずれも約 10 $^{\circ}\text{C}$ 低下しており、この効果が出力増加の要因になっているものと判断できる。低水温冷却の効果については、2.3.2.3 章において詳細な検討を行っている。

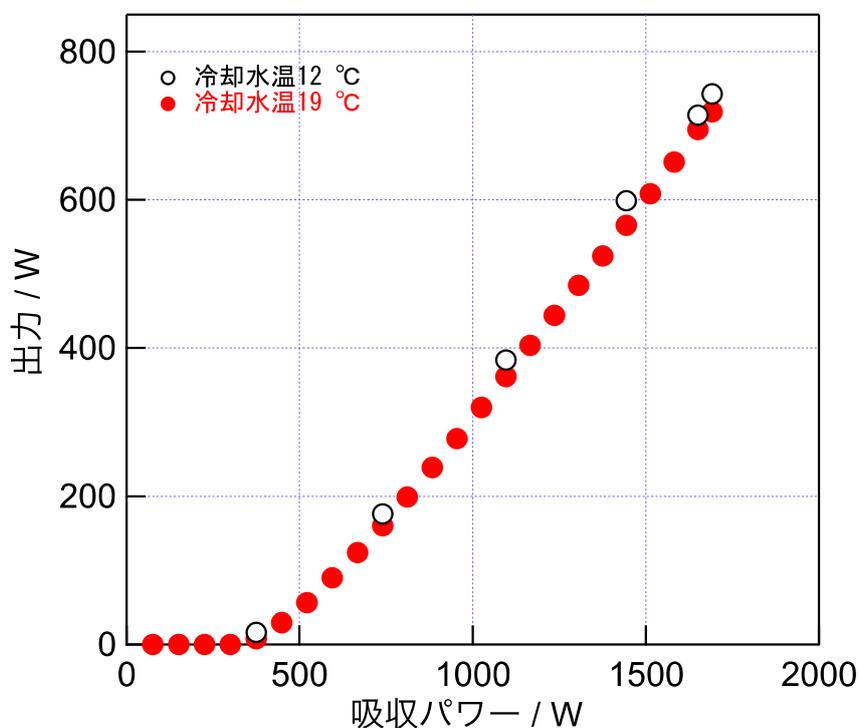


図 2.3.1.3.2-3 2 段励起によるレーザー出力特性 (励起ビーム径 $\phi 6\text{mm}$)

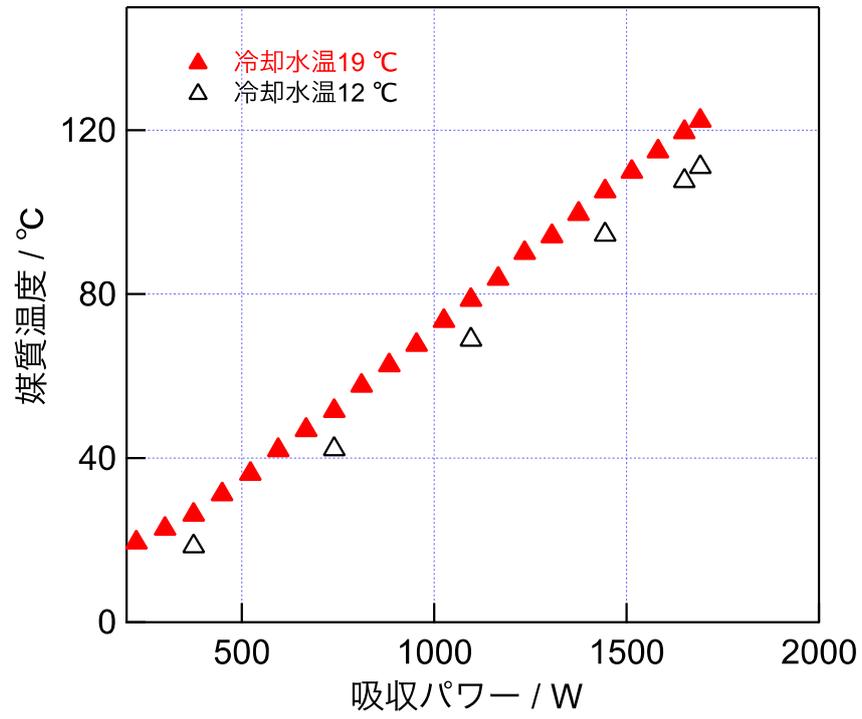


図 2. 3. 1. 3. 2-4 2 段階励起時の媒質温度特性 (励起ビーム径 ϕ 6mm)

2.3.1.4 レーザー総合発振試験

2.3.1.4.1 3段励起方式によるレーザー発振試験

kW級高出力スケールリング(2.3.1.2.2章)による出力予測では、kWを越える出力を得るためには2kWを越える吸収パワーが必要と考えられることから、励起段数を1段増加した3段励起方式によるレーザー発振試験を行った。光吸収率の計算では、3段励起では2kWを越える吸収パワーが得られ(表2.3.1.3.1-1)、さらに低水温かつ高噴流速度条件での冷却による出力増加に期待できる。実験配置を図2.3.1.4.1-1に示す。2段目の励起によっても吸収されなかった励起光をミラーにより反射し、再度媒質に入力した(3段励起)。光路にレンズを挿入し、Yb:YAG層上でのビーム径を調整した。図2.3.1.4.1-2に、1~3段励起時の媒質励起面上でのYb蛍光プロファイルを示す(入力10W)。励起段数の増加に伴い蛍光強度も増加する。励起中心部での蛍光強度のY方向成分(図2.3.1.4.1-3)から、蛍光ピーク強度の増加分を見積もると、2段励起では1段励起の1.5倍、3段励起では1段励起の1.85倍(予測では1.75倍)であったことから、3段目の励起でのビーム径は他に比べやや小さいと考えられるものの、ほぼ予測通りの吸収パワーの増加が見込まれる。噴流速度は20m/sまで増加、水温は7°Cまで低下させ、試作装置のほぼ最大性能で冷却を行った。出力特性比較のため、水温を18°Cに上げた条件でも同様に試験を行った。

図2.3.1.4.1-4に、3段励起によるレーザー出力特性を示す。水温18°Cでの冷却では、スロープ効率は58%であったのに対し、水温を7°Cまで低下させた冷却では、スロープ効率は約4%増加(62%)し、冷却性能の向上による出力の増加が見られた。図2.3.1.4.1-5に、出力と同時計測した励起中心部の媒質温度を示す。同じ吸収パワーで比較すると、7°Cでの媒質温度は18°C冷却時に比べ約8°C低下し、水温低下による媒質温度の低下が観測された。出力の最大値は938W(入力2.36kW時)であり、3段励起および低水温での冷却によりほぼ1kWのレーザー出力を得ることに成功した。一方で、3段励起時の最大吸収パワーを見積もると最大で1.95kWであった。事前に予測した2kWを越える吸収パワーは得られていない。吸収パワーの計算には光学素子の935nmでのわずかな反射なども考慮しており、3段励起方式により励起光学系が複雑になり、光学的な損失が増加したためであると考えられる。

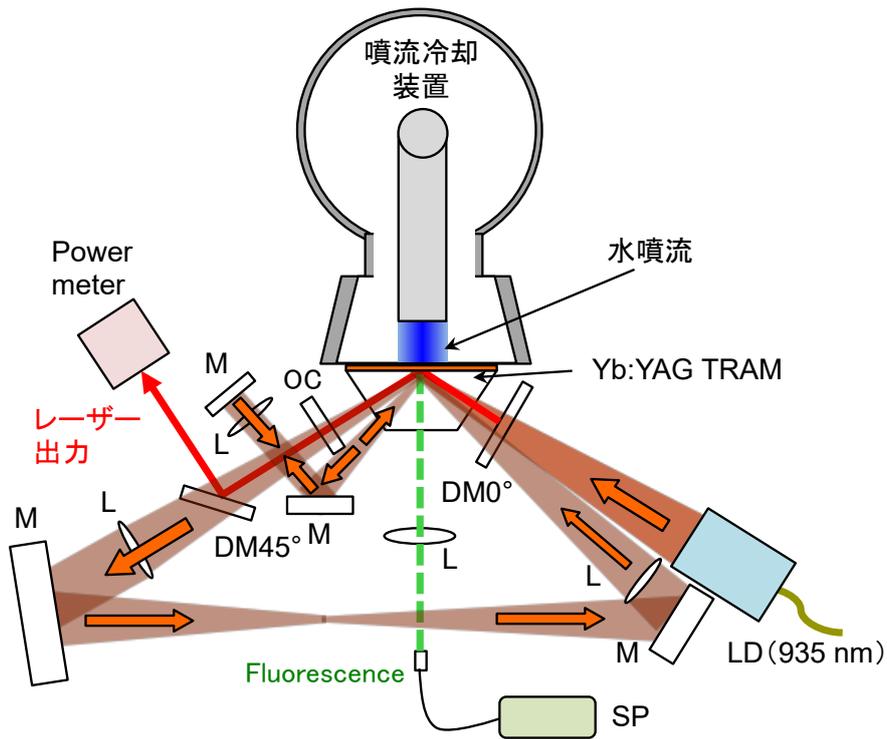


図 2.3.1.4.1-1 3 段励起方式によるレーザー発振試験配置

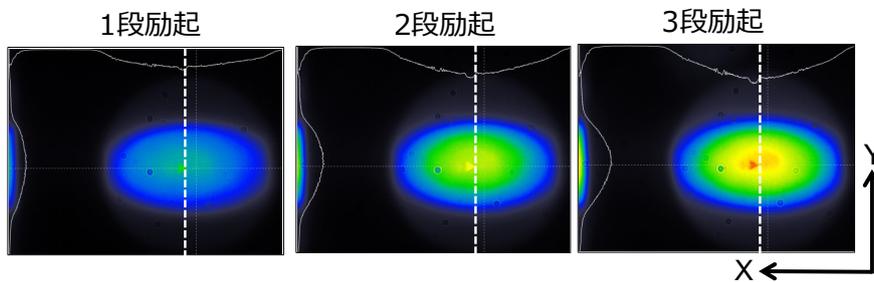


図 2.3.1.4.1-2 1～3 段励起時の励起面上での Yb 蛍光プロファイル

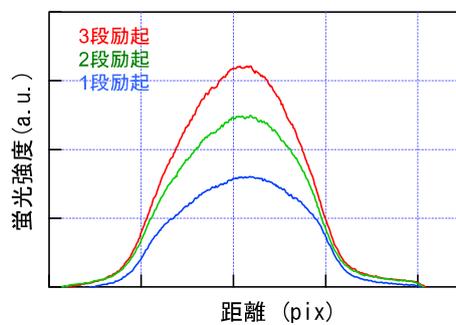


図 2.3.1.4.1-3 励起中心部での蛍光強度の Y 方向成分

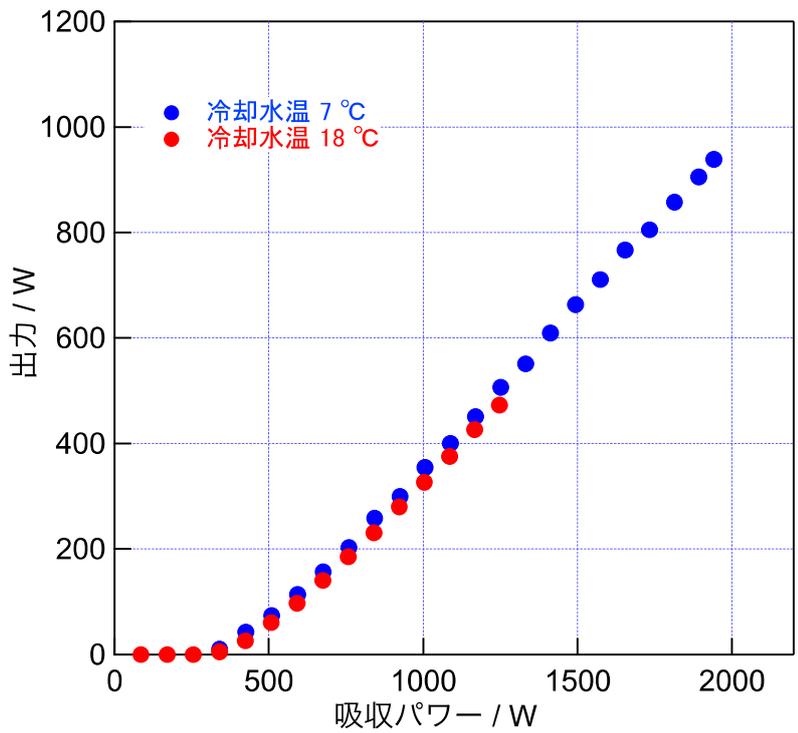


図 2.3.1.4.1-4 3 段励起によるレーザー出力特性

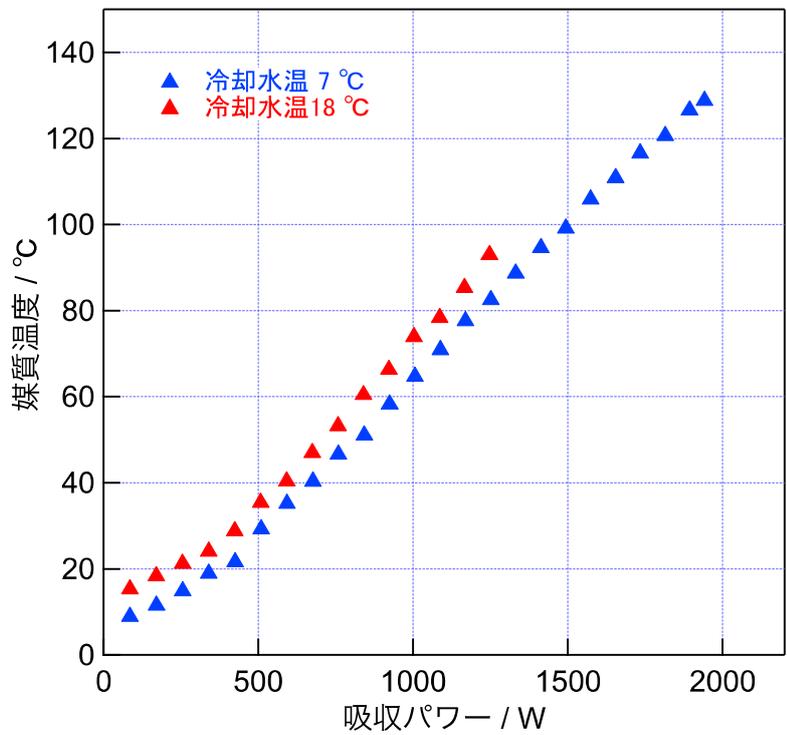


図 2.3.1.4.1-5 3 段励起時の媒質温度特性

2.3.1.4.2 1kW出力の実証（4段励起）

1kWを越える出力を実証するため、励起を1段増加した4段励起方式によるレーザー発振試験を行った。配置図を図2.3.1.4.2-1に示す。4段目の励起には、最大600WのZPL励起用LDを使用した。935nm励起光源の隣にLDを配置し、レンズにより励起ビーム径を調整して媒質に入射した。最大励起パワーは2.96kW（935nmLD: 2.36kW、969nmLD: 600W）である。これにより2.2kW以上の吸収パワーが得られる。これ以外の実験条件は3段励起時と同一とし、噴流冷却の最大冷却条件（噴流速度20m/s、水温7°C）でレーザー発振試験を行った。レーザー出力特性を図2.3.1.4.2-2に示す。2.96kW励起時に最大出力1070Wを出力し（図2.3.1.4.1-3）、1kWを越える出力を実証した。スロープ効率は60%で、冷却性能が向上したことにより、高励起条件においても高い発振効率が保持できた。

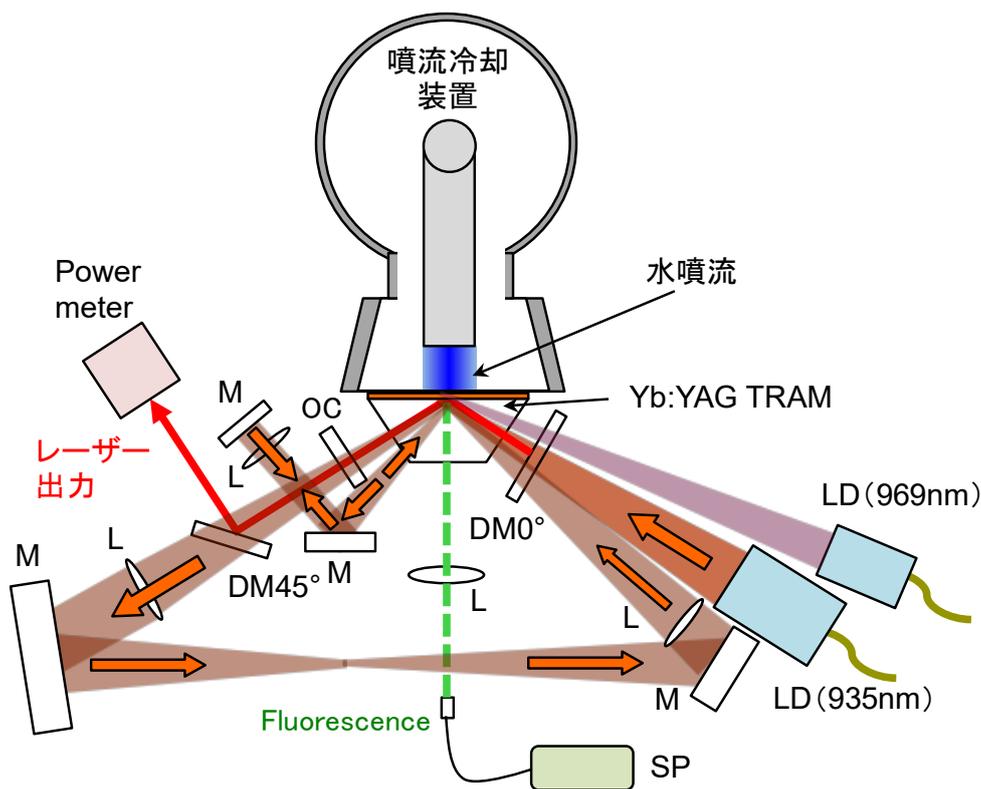


図 2.3.1.4.2-1 4段励起方式によるレーザー発振試験配置

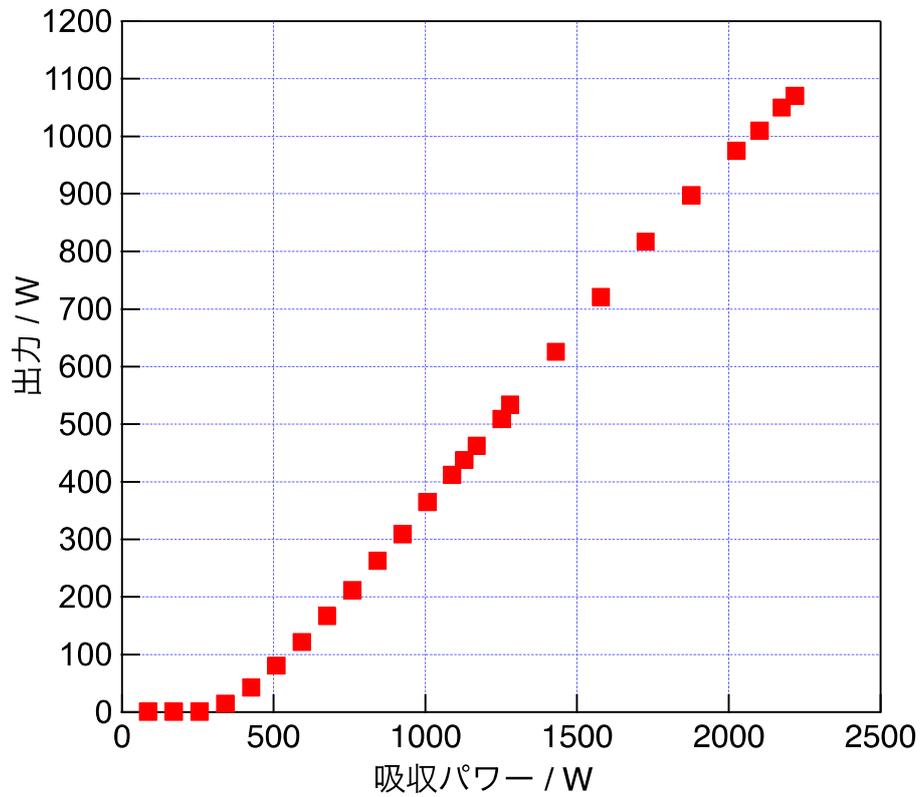


図 2.3.1.4.2-2 4 段励起方式による出力特性



図 2.3.1.4.2-3 1070W 出力時のパワーメータ表示写真

多段励起方式を用いることにより、光励起に対する吸収率を高めることが可能となったことから、当初の計画にはなかった Yb 濃度 9.8%-層厚 0.2mmTRAM を用いてレーザー発振試験を行った。図 2.3.1.4.2-4 に、Yb 濃度 9.8%-層厚 0.2mmTRAM に多段励起を用いた際の光吸収率の温度依存性を示す(励起波長 935nm)。この媒質は層厚が薄く、1 段励起では光吸収率が 0.4 以下と非常に低いが、3 段励起を用いれば 0.7 以上の光吸収率が得られることがわかった。層厚の薄い媒質はレーザー特性が高く、また発熱層自体が薄いため、噴流冷却を用いた場合に高い冷却効果が得られる可能性がある。レーザー発振試験は図 2.3.1.4.2-1 で示した 4 段励起方式を用い、媒質のみを交換して他の実験条件は同一として行った。図 2.3.1.4.2-5 に発振試験で得られたレーザー出力特性を示す。図中(●)は 935nm のみの励起 (3 段励起) で、(○)は ZPL 励起パワーを 600W に固定して 935nmLD の励起パワーを変化させた条件で得られたものである。図 2.3.1.4.2-6 に媒質温度特性を示す。図中(▲)は 935nm のみの励起 (3 段励起) で、(△)は ZPL 励起パワーを 600W に固定して 935nmLD の励起パワーを変化させた条件で得られた値である。2.96kW 入力時の最大出力は 1030W であり、異なる 2 種の媒質で 1kW を越える出力を実証できた。スロープ効率は 67%であり、Yb 濃度 5%-層厚 0.6mmTRAM よりも高い効率が得られた。また、図 2.3.1.4.2-6 に示すように媒質温度は入力 2.96kW 時でも 60°C 以下に保持されていることがわかった。噴流冷却による除熱効果が高く媒質温度の上昇が抑制されることで出力特性も高くなるものと考えられる。

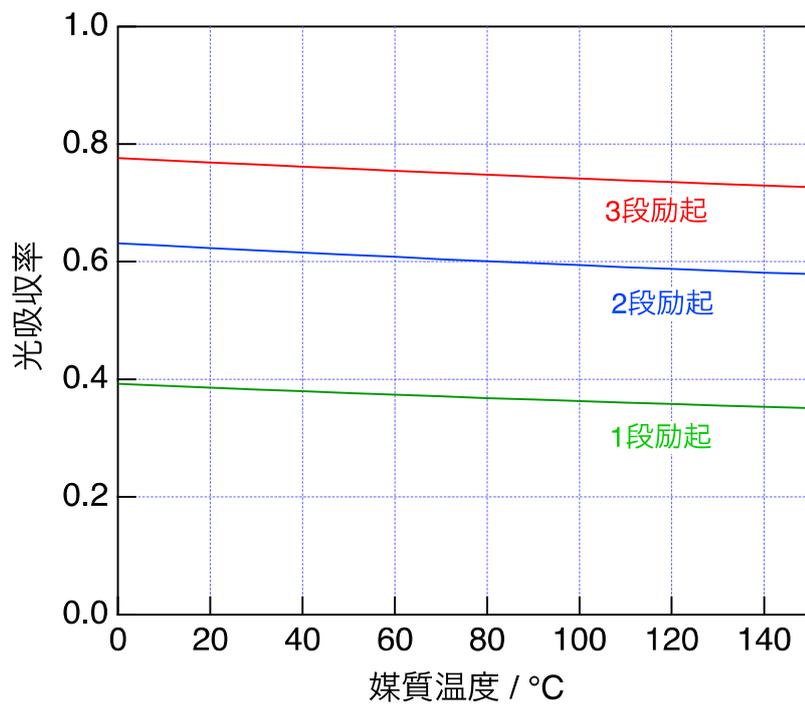


図 2.3.1.4.2-4 多段励起を用いた際の Yb 濃度 9.8at%-層厚 0.2mmTRAM の光吸収率の温度依存性

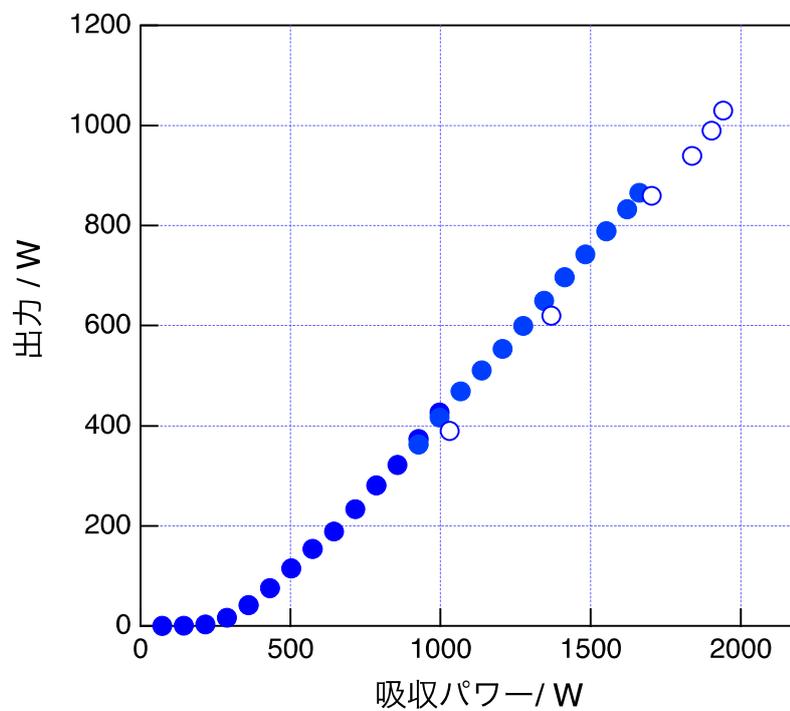


図 2.3.1.4.2-5 4 段励起方式によるレーザー出力特性 (Yb 濃度 9.8at%-層厚 0.2mmTRAM)

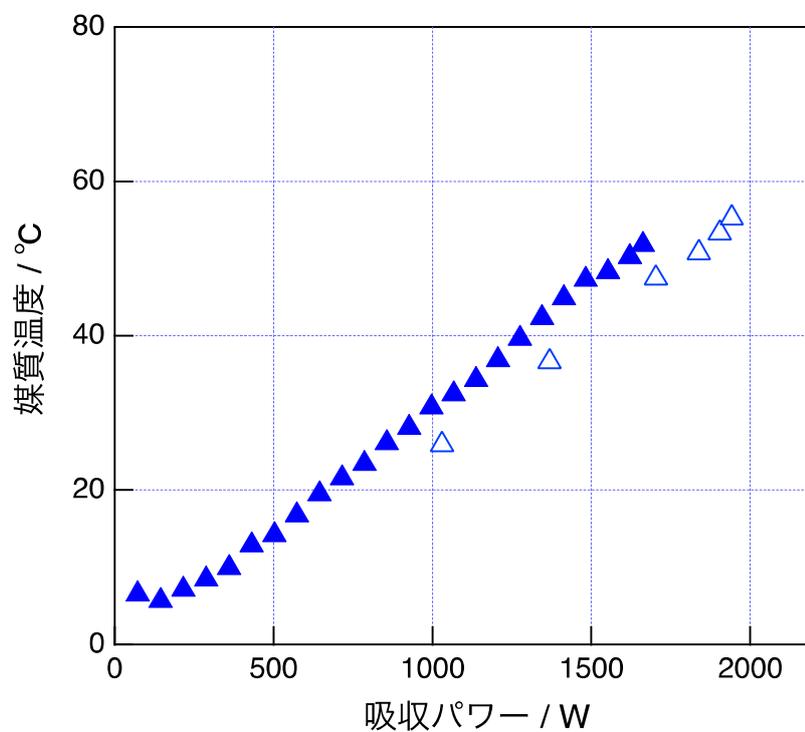


図 2.3.1.4.2-6 Yb 濃度 9.8at%-層厚 0.2mmTRAM の 4 段励起時の媒質温度特性

2.3.1.5 出力スケーリング則を用いた 10kW 級高出力化の可能性と拡張性の検討

レーザー発振総合試験により得られた kW 出力のレーザー特性に基づき、出力予測モデルを用いて 10kW 出力のためのスケーリングを行った。図 2.3.1.5-1 に、Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM のレーザー発振試験により得られた 1kW レーザー出力特性 (940nm 励起) と、出力予測モデルにより得られた計算値とを比較した図を示す。計算値は実験値をほぼ再現しているため、ここで設定したパラメータを基準に 10kW 級高出力化スケーリングを行った。図 2.3.1.5-2 に、励起ビーム径のみを変更して計算した出力特性を示す。励起径が大きくなると、発振しきい値が増加することがわかる。次に励起ビーム径をさらに大きくして、10kW の出力が得られる条件について検討した。その結果、図 2.3.1.5-3 に示すように、励起ビーム径を $\phi 2\text{cm}$ 、吸収パワー 25kW で 10kW を越える出力が得られると予測された。この時の媒質温度は約 140°C であり、1kW 出力時の媒質温度と同様である。多段励起方式を用いることで、10kW の出力に必要な入力値は 30kW まで低下させることが可能となる。

このスケーリングは実験結果を元に行なっているため励起波長には 940nm を用いているが、同じ条件で励起をゼロフォノンライン (969nm) に変更した場合の出力を計算した。結果を図 2.3.1.5-4 に示す。吸収パワーに対する出力特性は、ゼロフォノンライン励起時の方が高くなっており、10kW の高出力条件においてもゼロフォノンライン励起の方が出力特性に有利に働くものと予測される。

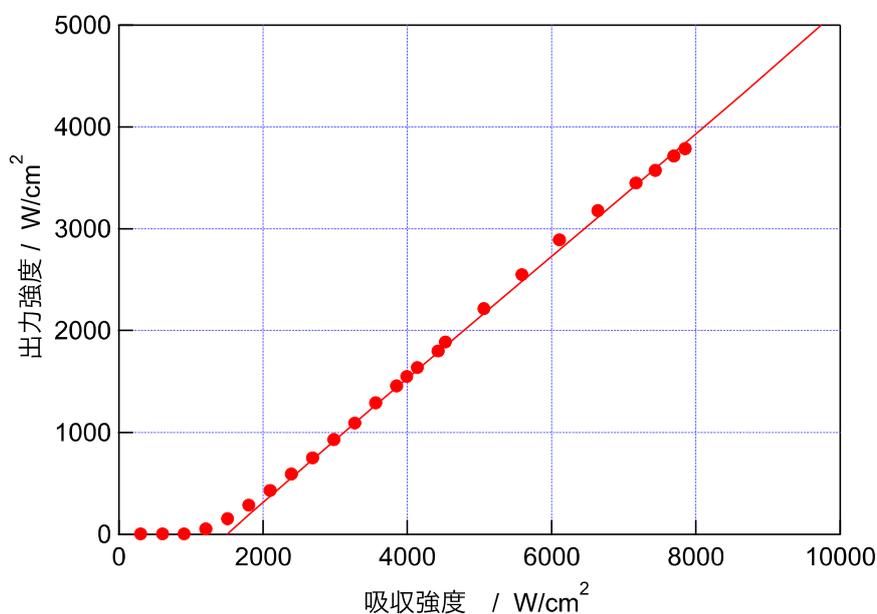


図 2.3.1.5-1 Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM のレーザー出力特性 (●) と、発振出力モデルを用いた計算値 (-) との比較

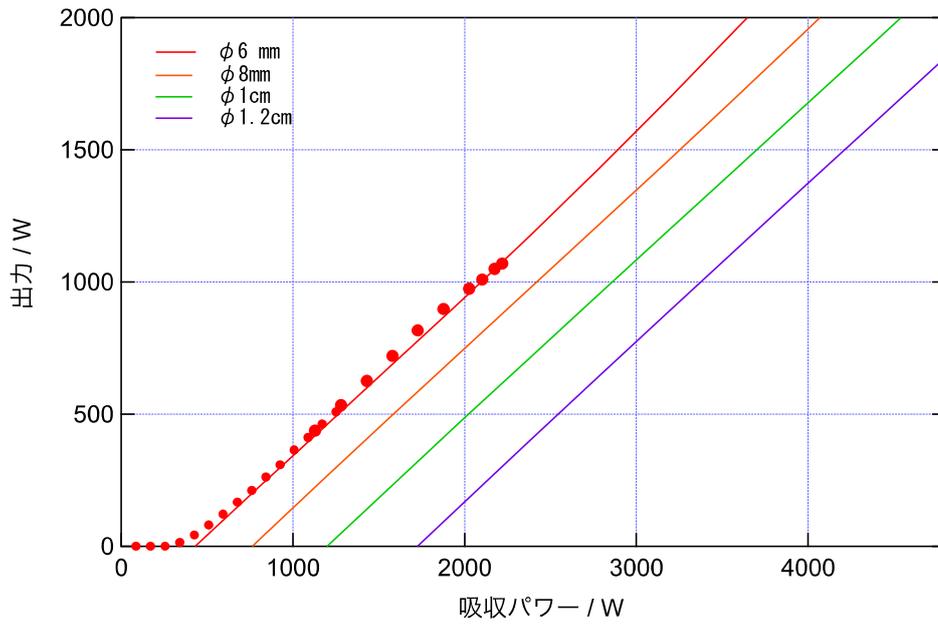


図 2. 3. 1. 5-2 励起ビーム径のみを変化させた場合のレーザー出力特性変化の予測

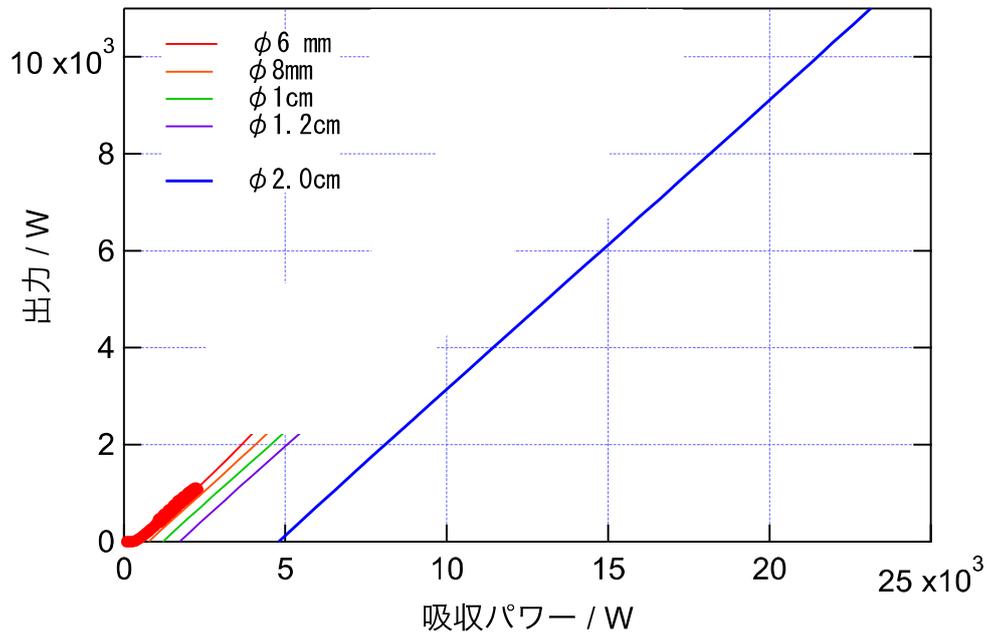


図 2. 3. 1. 5-3 励起ビーム径 2cm 時の出力特性予測 (940nm 励起)

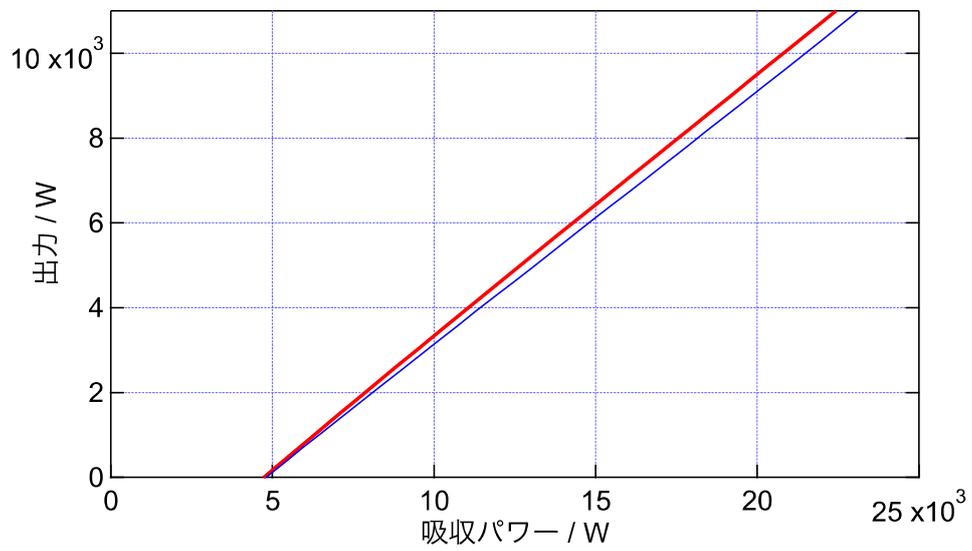


図 2.3.1.5-4 ゼロフォノン励起〔赤線〕と 940nm 励起（青線）時の出力特性の比較
（ビーム径 ϕ 2cm）

2.3.2 冷却装置の試作

2.3.2.1 概要

2017年度（平成29年度）に試作した衝突噴流方式の冷却装置の冷却性能検証より得たデータを元に、装置の改良を行った。改良の効果は、2017年度と同様に模擬発熱体を用いた試験にて確認した。

また本年度までの結果を踏まえ、さらなる高出力化の実現に向けて10kW級レーザーに必要な冷却システムの主要諸元について検討を行った。研究の流れを図2.3.2.1-1に示す。

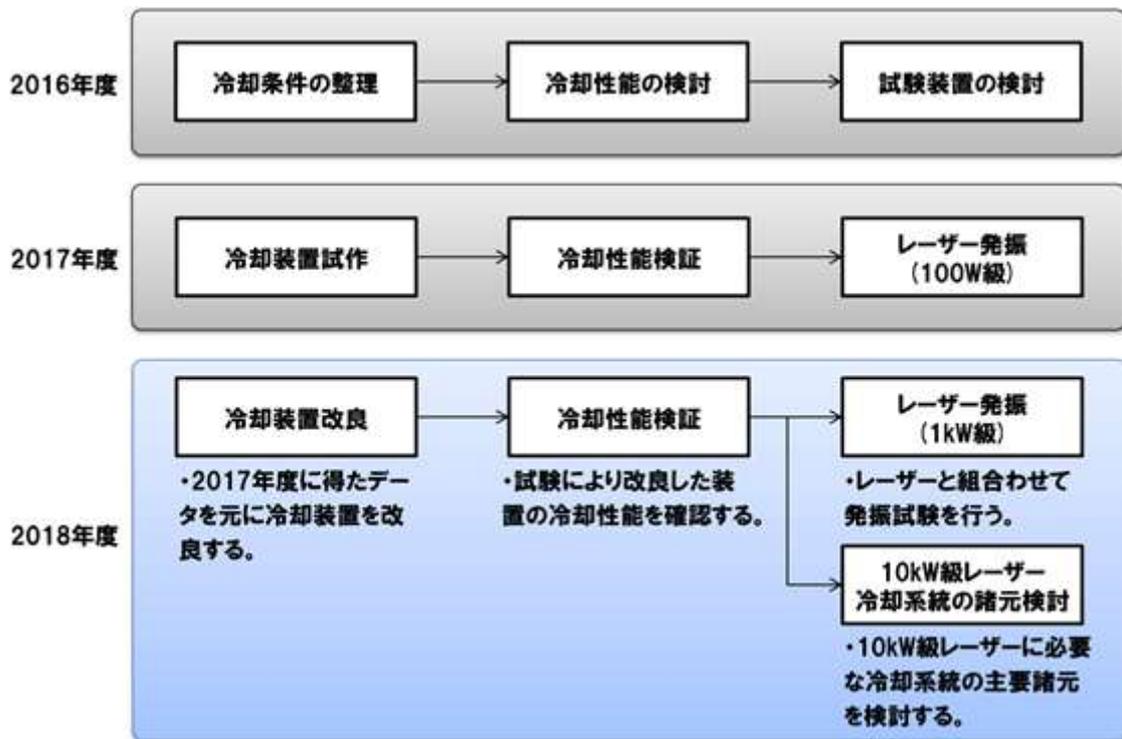


図 2.3.2.1-1 研究の流れ

2.3.2.2 冷却装置改良

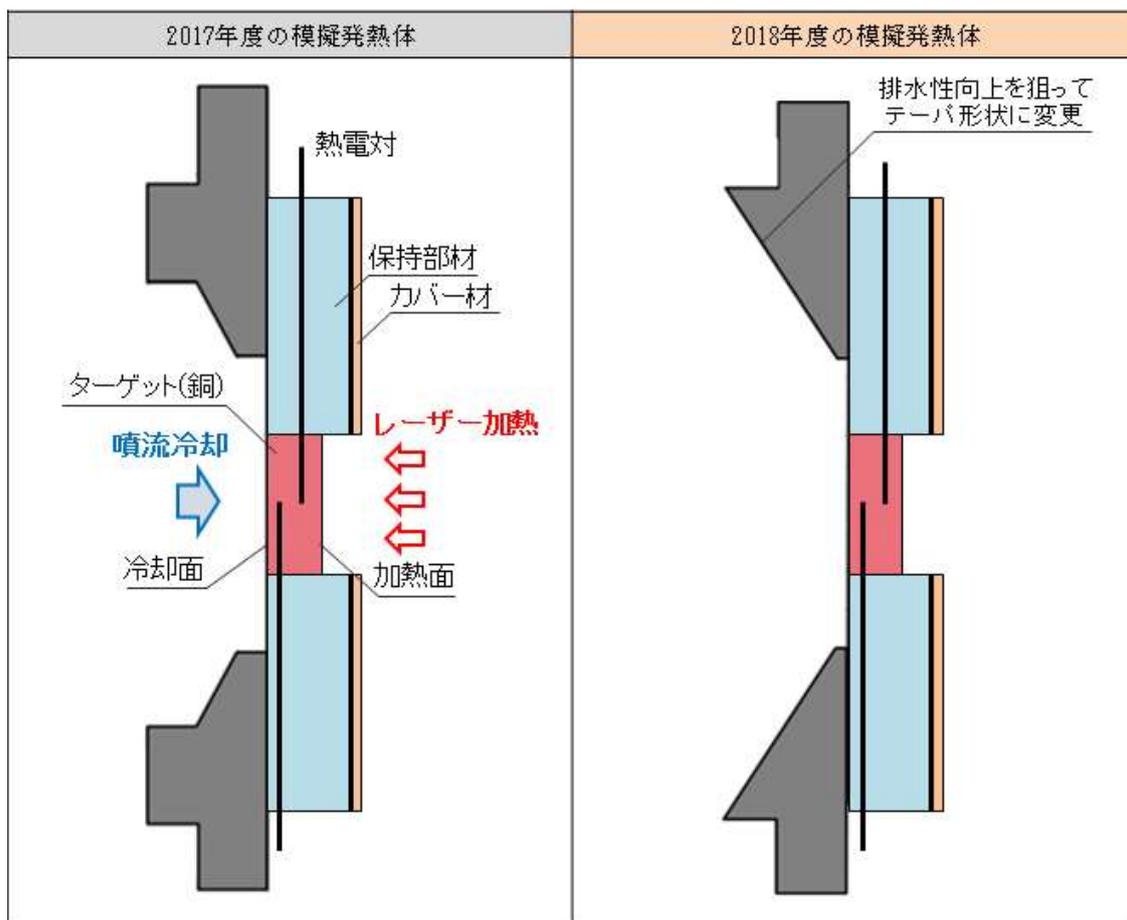
2017年度の冷却試験では、噴流速度が高い領域で、冷却面近傍で排水性が悪化している可能性があったために、噴流速度17m/s以上での冷却試験は十分に実施できなかった。2018年度はその対策として、次に示す(1)の改良を施工し、噴流速度17m/s以上での冷却試験を実施した。

(1) 供試体ホルダ（排水性向上）

冷却試験用模擬発熱体の改良形状を表2.3.2.2-1に示す。

2017年度の冷却性能評価試験では、噴流速度が17m/s以上の領域において冷却面周囲の排水性が悪化している可能性が確認されたことから、2018年度は、模擬発熱体のホルダ形状を表2.3.2.2-1に示す形状に変更し、冷却面衝突後の冷媒の排水性の改善を図った。

表 2.3.2.2-1 2018年度の模擬発熱体の改良形状



2.3.2.3 冷却性能検証

本年度の冷却性能検証の試験方法を以下に示す。昨年度と同様の試験方法にて試験を実施した。

(1) 冷却試験用模擬発熱体

噴流速度17m/s以上の領域で試験を実施するにあたり、ターゲット(銅)と保持部材との間のシール性能向上を図り、2018年度は、シール材を変更して模擬発熱体を作成した。模擬発熱体のホルダ形状とシール材の組合せを表2.3.2.3-1に示す。これらを除いて2017年度から変更はない。

表 2.3.2.3-1 模擬発熱体の種類

	2017年	2018年
ホルダ形状	テーパ無し	テーパ有り
シール材	高耐熱シリコン ガスケット	超耐熱用シーリング材
シール性状	非硬化性	硬化性
備考	—	17m/s以上の噴流速度において、シール性を向上するため本シーリング材を用いた。

模擬発熱体内の加熱部および冷却部は純銅ブロックで、加熱面には黒体塗料を塗布しており、レーザーを照射して加熱し、裏面を水噴流にて冷却する。内部にはシース熱電対が厚さ方向へ挿入されており、銅ブロック内部の厚さ方向への温度分布から冷却面の温度を評価する。

なお銅ブロックの周囲は、耐熱性が高く、熱伝導率が低い(=0.3W/(m・K)^{*1})ミオレックスPGX-595を使用した。

^{*1} メーカーカタログ値

(2) 模擬発熱体の設置位置

冷却性能を評価するために、レーザー媒質の設置位置に、冷却性能評価用の模擬発熱体を設置し(図 2.3.2.3-1 を参照)、冷却性能の評価を行った。

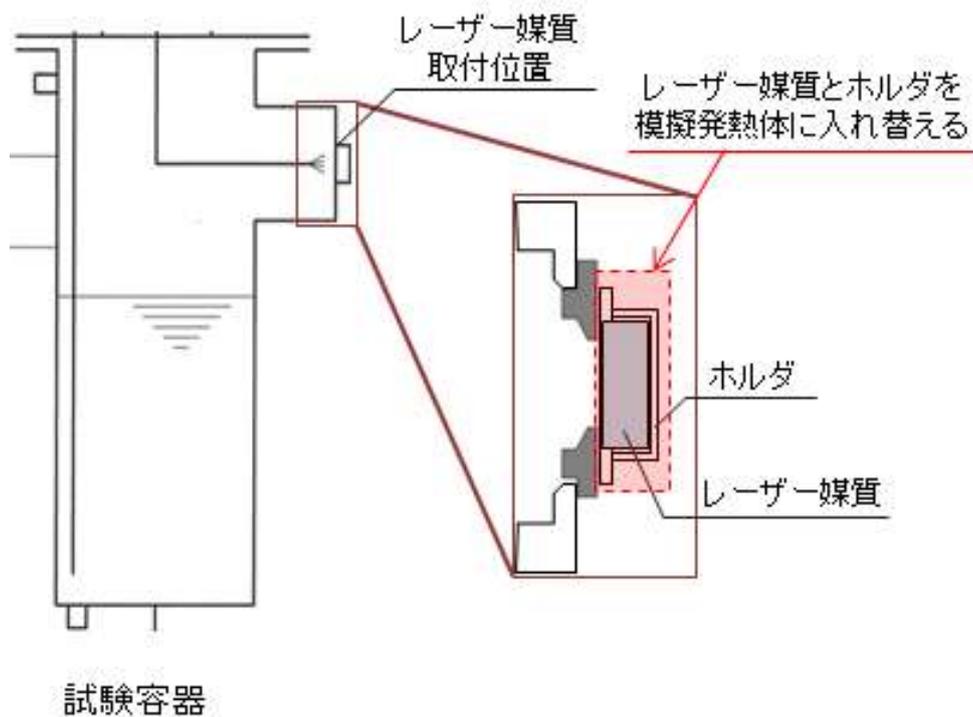


図 2.3.2.3-1 模擬発熱体の設置位置

2.3.2.4 試験データの評価方法

(1) 冷却面の熱流束

冷却面における熱流束の評価方法として、表 2.3.2.4-1 に示すように①パワーメータの出力から算出する方法と、②銅ブロック内の温度分布から算出する方法の2つの方法で評価を行った。詳細は 2.3.2.6 (1) で議論する。

表 2.3.2.4-1 冷却面熱流束の評価方法

評価方法① (2017年度)	①パワーメータの出力から算出する方法 $q = \frac{\eta Q_L}{A}$			
	記号	内容	単位	計測方法
	q	冷却面の熱流束(評価する値)	W/m ²	—
	η	レーザー光の表面吸収率	—	黒体塗料カタログ値 ⁽⁵⁾
	Q_L	レーザー光の入射パワー	W	パワーメータで計測する
A	冷却面の面積	m ²	供試体の寸法を計測する	
評価方法② (2018年度)	②銅ブロック内の温度分布から算出する方法 模擬発熱体の厚さ方向に設置した2本の熱電対の計測値より、1次元定常熱伝導を仮定して熱流束を求める。 $q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta_{12}}$			
	記号	内容	単位	計測方法
	q	冷却面の熱流束(評価する値)	W/m ²	—
	λ	銅ブロック(純銅)の熱伝導率	W/(m・K)	文献値より(温度依存性有り) ⁽⁶⁾
	T_1	銅ブロック内部計測温度 (加熱面側)	℃	熱電対で計測する
	T_2	銅ブロック内部計測温度 (冷却面側)	℃	熱電対で計測する
δ_{12}	温度計測位置の間隔	m	図面の寸法値	

(2) 冷却面の温度

冷却面の温度評価の方法を表 2.3.2.4-2 に示す。なお、評価方法は 2017 年度と同様である。

表 2.3.3.4-2 冷却面温度の評価方法

評価方法	冷却面の温度評価方法は以下の通り。			
	$T_S = T_2 + \frac{q\delta_{2S}}{\lambda}$			
	記号	内容	単位	計測方法
	T_S	冷却面の温度	℃	—
	T_2	冷却面側の熱電対計測温度	℃	熱電対で計測する
	q	熱流束	W/m ²	「冷却面の熱流束の評価方法」から算出する
δ_{2S}	冷却面表面と冷却面側熱電対の間の距離	m	図面の寸法値	
λ	銅ブロック(純銅)の熱伝導率	W/(m・K)	文献値より(温度依存性有り)	
備考	評価位置：中央部、端部の 2 箇所について評価を行う。			

2.3.2.5 試験条件

2017年度と2018年度に実施した試験条件を表2.3.2.5-1に示す。2018年度は以下3項目について評価を行った。

評価①：2017年度試験の再現性を確認すると共に、模擬発熱体のホルダ形状の改良の影響を確認する（表2.3.2.2-1）。

評価②：噴流速度17m/s以上の条件での冷却性能データを取得し、噴流速度が冷却性能に及ぼす影響を評価する。

評価③：冷媒温度が低い場合*2での冷却性能を確認する。

表 2.3.2.5-1 2017年度と2018年度の試験条件一覧

		ホルダ	噴流速度 [m/s]					
			5.0	10.0	15.0	17.0	20.0	25.0
冷媒温度	7°C	ア	—	—	—	—	—	—
		イ	q	r	—	s	t	u
	15°C	ア	E、F	—	—	—	—	—
		イ	j	k、l	m	n	o	p
	20°C	ア	A	B	C	D	—	—
		イ	a	b	c	d、e	f、g、h	i
	30°C	ア	—	—	—	—	—	—
		イ	—	—	—	—	x	—
	50°C	ア	G	—	—	—	—	—
		イ	—	—	—	—	—	—
	70°C	ア	H	—	—	—	—	—
		イ	—	—	—	—	—	—

ア：2017年度ホルダ

イ：2018年度ホルダ(改1)

*2 図に示した試験装置構成においては、冷媒の最低温度は約15°Cであった。このため、温水タンク内に氷を投入し、冷媒温度7°Cの条件を設定した。

<試験手順>

各試験条件に対し、以下の手順で試験を実施した。

- ①冷媒温度をセット
- ②噴流速度をセット
- ③レーザーを照射し、計測温度監視モニタにて定常状態を確認後、15～60 秒間計測^{*3}
- ④レーザー出力を増加し再度計測

レーザーは表 2.3.2.5-2 のように電流値を 10A ごとに増加させて出力を上昇させた

^{*4}。

表 2.3.2.5-2 レーザー照射出力

(a) 2017年度計測値

電流値(A)	レーザー出力(W)	加熱面供給エネルギー(W)	入熱率
20	205	173.9	0.848
30	527.8	453	0.858
40	853	730	0.856
50	1171	1003	0.857
60	1488	1273	0.856
70	1790	1541	0.861
77	1970	1687	0.856
80	2077	1778	0.856
90	2336	2003	0.857
94	2434	2085	0.857

(b) 2018年度計測値

電流値(A)	レーザー出力(W)	加熱面供給エネルギー(W)	入熱率
20	204	180	0.882
30	519	463	0.892
40	838	748	0.893
50	1143	1024	0.896
60	1443	1295	0.897
70	1737	1548	0.891
77	1927	1715	0.890
80	2008	1786	0.889
90	2256	1998	0.886
94	2350	2075	0.883

^{*3} 試験中に計測モニタにて定常状態になっていることを確認した。

^{*4} 途中の 77A は、目標の熱流束 1.0kW/cm^2 にパワーメータの計測誤差+7%を考慮した場合(=1.096 kW/cm^2)の出力である。

2.3.2.6 試験結果・考察

(1) 熱流束の評価方法の比較

同一の噴流速度条件下において、水漏れがない場合（2017年度：条件D）と、水漏れがある場合（2018年度：条件e）の比較を図2.3.2.6-1に示す。水漏れが無い場合、模擬発熱体内の温度分布から算出した熱流束（評価方法②）と、パワーメータの値から算出した熱流束（評価方法①）がほぼ一致しているのに対し、水漏れが生じた場合は前者が後者より若干低い。これは、加熱面に漏れた水分が蒸発したことにより、加熱面での冷却が生じたためと推定される。

一方、水漏れに起因した加熱面からの冷却の影響は小さく、且つ、模擬発熱体の内部温度分布から算出した熱流束を用いることで、加熱面からの冷却分の誤差を除外することが可能となることから、本検討では、模擬発熱体内部の温度分布から算出した熱流束にて計測データを整理することとした。

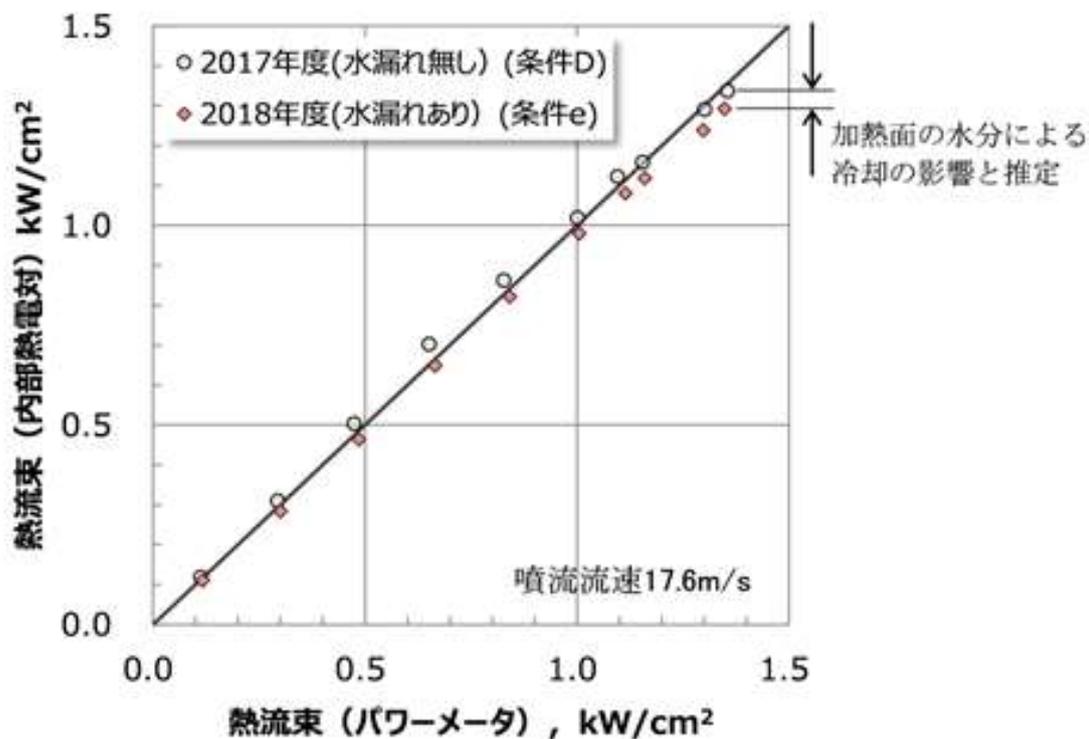


図 2.3.2.6-1 加熱面への水漏れの影響

(2) 排水性改良ホルダの効果

常温の冷媒を用いた場合での、噴流速度と冷却面温度の関係を図2.3.2.6-2に示す。熱流束は銅ブロック内の熱電対の温度差から算出したもの（表2.3.2.4-1中の評価方法②）を使用し、熱流束 $1.0\text{kW}/\text{cm}^2$ 前後の計測値から線形補間することで $1.0\text{kW}/\text{cm}^2$ における冷却面温度を評価した。噴流速度 $15\text{m}/\text{s}$ 以下においては、2017年度と2018年度の計測値に差異はほとんど無く、2018年度の試験においても2017年度の試験を再現可能であることが確認できた。

一方、噴流速度 $17\text{m}/\text{s}$ において、2018年度は2017年度より冷却面温度が約 12°C 低い（=冷却性能が向上）ことが確認された。本噴流速度は、2017年度には衝突点周りの流れ場の変化が確認された条件であることから、2018年度に新たに採用した排水性改良ホルダの効果により、衝突点周りの排水性が改善、冷却性能が向上したものと考えられる。

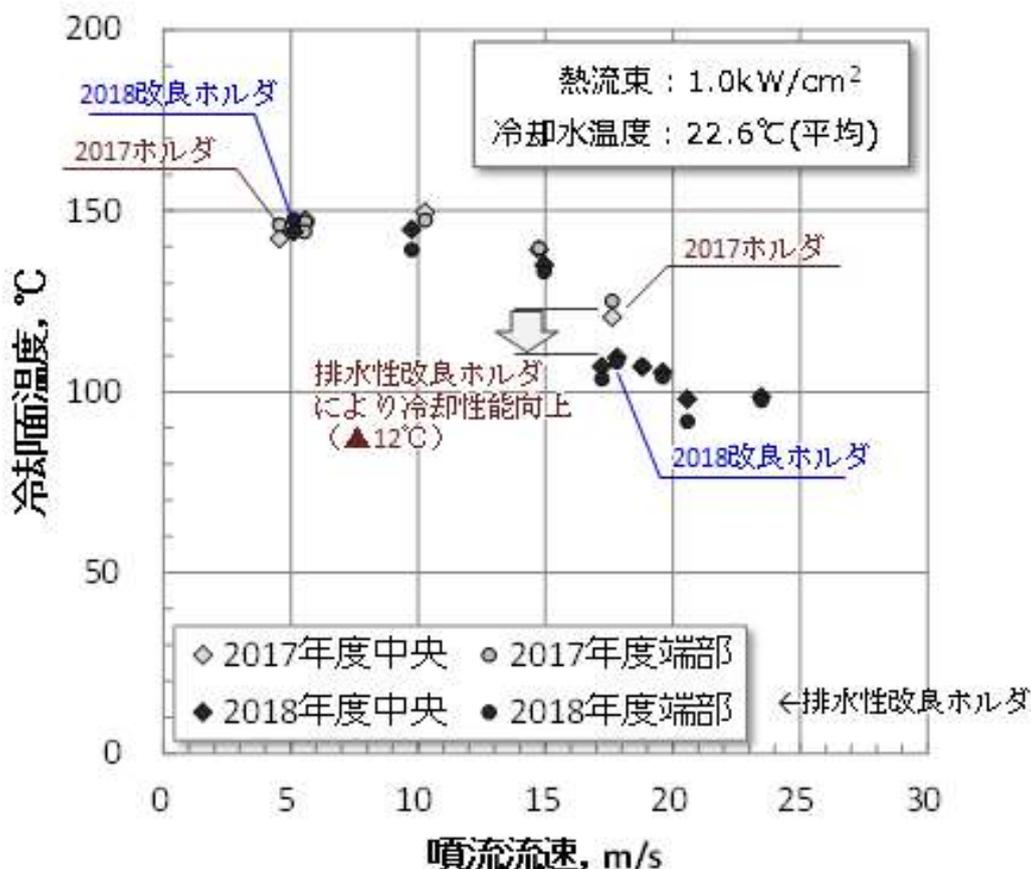


図 2.3.2.6-2 排水性改良ホルダの効果

(3) 冷却面の温度

熱流束 $1.0\text{kW}/\text{cm}^2$ における冷却面温度の評価結果を図2.3.2.6-3に示す。

噴流速度 $15\text{m}/\text{s}$ 以下では、流速が冷却面温度に及ぼす影響は小さい。これは、本領域が沸騰伝熱支配のためと推定される。一方、噴流速度 $15\text{m}/\text{s}$ 以上では、噴流速度が高いほど冷却面温度が低下している。これは、対流伝熱の影響が大きくなったためと考えられる。

冷媒温度は同じままで噴流速度を $24\text{m}/\text{s}$ へ増加した場合、冷却面温度が 98.4°C へ低下（噴流速度 $17\text{m}/\text{s}$ に比べて 11°C 低下）できることを確認した。

一方で、噴流速度は $17\text{m}/\text{s}$ のままで、冷媒温度を 6.9°C まで低下（ -15.5°C ）した場合、冷却面温度が 15.9°C 低下することを確認した。冷媒温度の低下量と冷却面温度の低下量がほぼ一致していることから、対流伝熱支配領域と考えられる。

更に、噴流速度を $24\text{m}/\text{s}$ として、 6.9°C の冷媒を用いた場合、冷却面温度が 77.6°C へ低下（噴流速度 $17\text{m}/\text{s}$ 、常温水に比べて 31.8°C 低下）できることを確認した。本条件は、今回実施した試験条件の中で最も冷却性能の高い条件である。

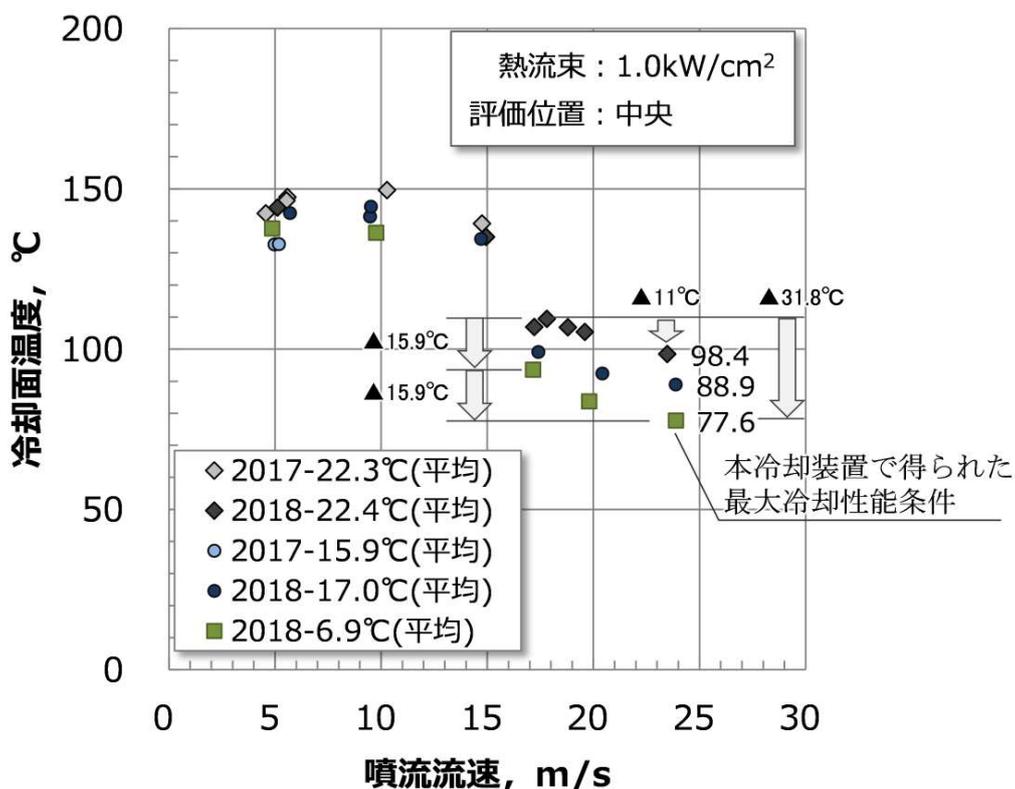


図 2.3.2.6-3 冷却面温度の計測結果

(4) 冷却性能（熱伝達率）

冷却面における熱伝達率の評価結果を図2.3.2.6-4に示す。本評価で用いた熱伝達率の定義は以下の通りである。

$$h = \frac{q}{T_s - T_c}$$

h : 熱伝達率, W/m²/K
 q : 熱流束, W/m² (=1kW/cm²)
 T_s : 冷却面の温度, °C
 T_c : 冷媒の温度, °C

噴流速度15m/s以下では熱伝達率は噴流速度に対してほぼ一定であるが、これは前述したように沸騰熱伝達の支配領域であるためと考えられる。

一方で、噴流速度17m/s以上では、噴流速度の0.58乗に比例して熱伝達率が向上している。また、熱伝達率は冷媒温度によらずほぼ同一値となっている。つまり、噴流速度が同じであれば、冷媒温度を下げると、冷却面温度は大よそそれに比例して低下すると考えられる。

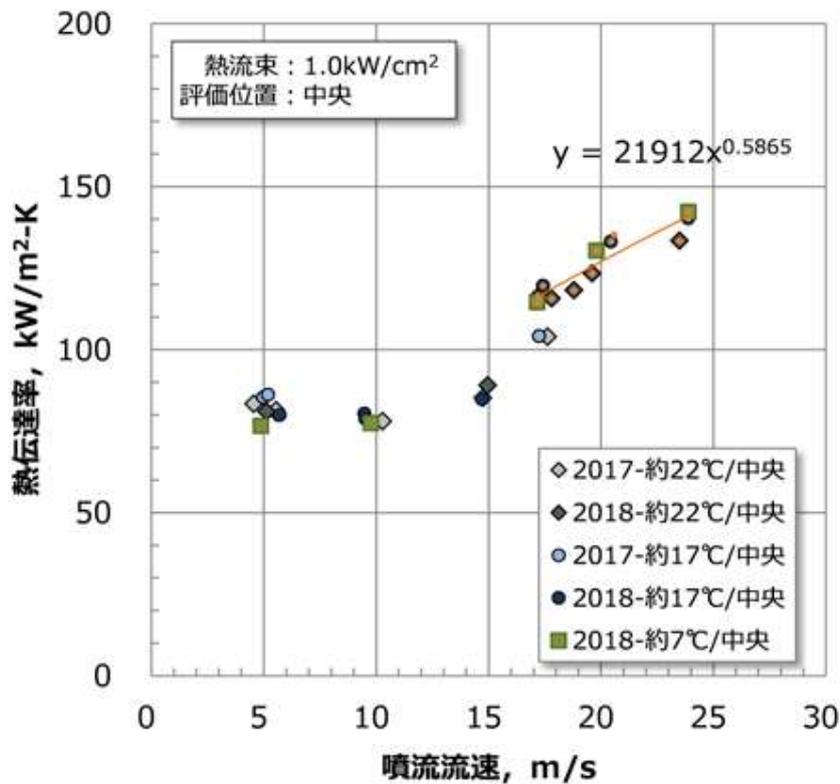


図 2.3.2.6-4 噴流冷却面における熱伝達率

(5) 最大冷却性能条件

本試験装置で得られた最大冷却性能条件（条件u）と、標準条件（条件a）の比較を図 2.3.2.6-5に示す。評価熱流束である 1.0 kW/cm^2 において、最大冷却条件では標準条件に対して 66.5°C 冷却面の温度を低下させることが可能となった。

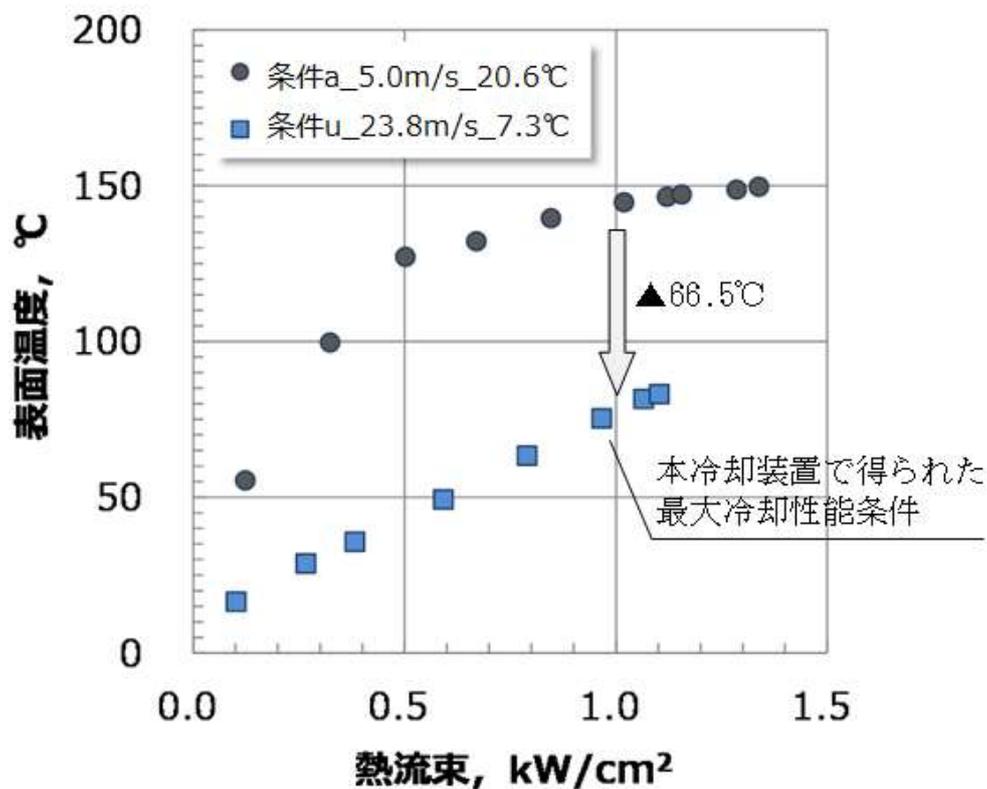


図 2.3.2.6-5 本試験装置で得られた最大冷却性能条件

2.3.2.7 まとめ

- 2018年度は、2017年度に試作した衝突噴流方式の冷却装置について改良を行った。
- 2017年度に実施の冷却性能評価試験等で得たデータを元に検討した冷却条件を、レーザー発振総合試験において噴流速度17m/s以上での適用を目標に、冷却系統各部の見直し、改良を必要に応じて実施した。
- 昨年度、改善点として挙げた噴流の乱れに関する対策として、ホルダ形状の改良を実施した。
- ホルダ形状の改良による排水性の向上は、冷却面温度を約12°C低下させる効果があることを確認した。 [冷却条件：冷媒温度22.6°C(平均)、噴流速度17m/s]
- 噴流速度15m/s以下では、流速が冷却面温度に及ぼす影響は小さく、沸騰伝熱支配の領域で、噴流速度17m/s以上では、噴流速度が高いほど冷却面温度が低下しており、対流伝熱の影響が大きい領域であることを確認した。
- 噴流速度を約24m/s^{*5}まで増加した場合、冷却面温度は98.4°Cへ低下（噴流速度17m/sに比べて11°C低下）できることを確認した。 [冷却条件：冷媒温度23.4°C(平均)]
- 更に、冷媒温度を6.9°Cへ低下させた場合、冷却面温度は77.6°Cまで低下（噴流速度17m/s、常温水条件に比べて31.8°C低下）できることを確認した。
- 噴流速度17m/s以上の対流伝熱領域において、熱伝達率を評価した結果、熱伝達率は冷媒温度によらずほぼ一定値となったことから、この領域では大よそ冷媒温度に比例して冷却面温度を低下させることができると考えられる。

*5 本装置で得られる最大流速

2.3.2.8 10kW 級レーザー冷却システムの諸元検討

本項では、10kW 級レーザーに必要な冷却システムの主要諸元（噴流速度等）について検討した結果をまとめる。

(1) 検討事項

検討事項とその内容を表 2.3.2.8-1 に示す。

表 2.3.2.8-1 検討事項

No.	検討事項	内容
1	10kW レーザー発振方式と冷却系の課題	<ul style="list-style-type: none"> ・10kW レーザー発振方式は以下 2 つの方法とする。 ① 励起面積 2 倍×5 箇所直列励起 ② 励起面積 10 倍×1 箇所励起 ・上記 2 つのレーザー発振方式について、冷却系での課題を抽出する。
2	熱応力解析による媒質の応力検討	<ul style="list-style-type: none"> ・媒質の発熱により生じる応力について、以下 2 つの条件で熱応力解析を行い、10kW レーザー発振方式の成立性を確認する。 ① 2018 年度に行ったレーザー発振総合試験の条件 ② 10kW レーザー発振方式の条件
3	各レーザー発振方法に対する冷却システムの主要諸元検討	<ul style="list-style-type: none"> ・No. 1 の 2 つの方式について冷却システムの基本仕様を選定する。主要諸元として以下を選定する。 ① ノズル基本構造 ② 噴流直径 ③ 噴流速度 ④ 冷媒流量 ⑤ ノズル部での圧力損失 ・上記以外についても、2016 年度の検討内容を参考に選定を行う。

(2) 10kW レーザー発振方式と冷却系の課題

表 2.3.2.8-1 より、それぞれの発振方式について検討した結果を整理したものを表 2.3.2.8-2 に示す。冷媒流量や圧力損失の詳細検討については(5)に示す。これにより冷媒流量が最も少なく、冷却ノズルや発熱範囲が 1kW 級レーザーでの検証試験結果の範囲内であることから、Case01 を推奨条件とする。

表 2.3.2.8-2 各発振方式の比較

項目	(参考) 1k 概レーザー φ7レーザー×1箇所動起	Case01: 10k 概レーザー 精円レーザー×5箇所動起	Case02: 10k 概レーザー 円形レーザー×5箇所動起	Case03: 10k 概レーザー 円形レーザー×1箇所動起
前提				
レーザー直径	φ7mm	長径14mm、短径7mm	φ9.8mm	φ22.14mm
噴流直径	φ7mm	φ7mm以上	φ9.8mm以上	φ22.14mm以上
有効冷却径	φ14mm (噴流径の2倍、発熱部の 長径をカバー)	φ14mm以上 (噴流径の2倍)	φ19.8mm以上 (噴流径の2倍)	φ44.28mm以上 (噴流径の2倍)
噴流速度	5~15m/s(計画値) 5~24m/s(実績値)	5~25m/s	5~25m/s	5~25m/s
冷媒流量	(ノズル1本) 11.5~55.4L/min (合計) 11.5~55.4L/min	(ノズル1本) 11.5~57.7L/min (合計) 57~238L/min	(ノズル1本) 23~118L/min (合計) 115~577L/min	(ノズル1本) 115~577L/min (合計) 115~577L/min
圧力損失	21mHg (@15m/s、計画時の最大値)	49.6mHg	49.6mHg	49.6mHg
利点	-	<ul style="list-style-type: none"> 1k部時の噴質が流用できる。 冷媒流量が少なく、冷却装置が小型化できる。 1k部時の冷却ノズルが流用できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 1k部時の噴質が流用できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 噴質は1個のみ。
得失	-	<ul style="list-style-type: none"> 1k部時の冷却ノズルが流用できる。 精円形状のレーザー出力のために追加の光宇系が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 噴質・冷却ノズルが複数必要 発熱部φ19.8mm条件での冷却性能は未検証 	<ul style="list-style-type: none"> 噴質の大型化(2.25倍)が必要 発熱部φ44mm条件での冷却性能は未検証

(3) 熱応力解析による媒質の応力検討

2018年度に行った1kWレーザー発振総合試験と10kWレーザー発振方式の各実験条件を基本として、熱応力解析を行った。それぞれの熱応力の解析条件を表2.3.2.8-3、熱応力の解析結果を表2.3.2.8-4に示す。

なお熱応力解析は、媒質の1/4の部分を解析モデルとした（図2.3.2.8-1を参照）。

表 2.3.2.8-3 解析条件

	1kW レーザー発振 (2018年度)	10kW レーザー発振 (Case01)
励起光入力 (媒質1個当たり)	2,960W	5,000W
Yb:YAG 部厚み	0.6mm	(同左)
励起部(発熱部)径	長径14mm×短径7mm	φ14mm
冷媒温度	7℃	(同左)
有効冷却部径	φ14mm	(同左)

表 2.3.2.8-4 熱応力解析結果 (相対比較)

	1kW レーザー発振	10kW レーザー発振
最大主応力 (最大値)	1	0.528

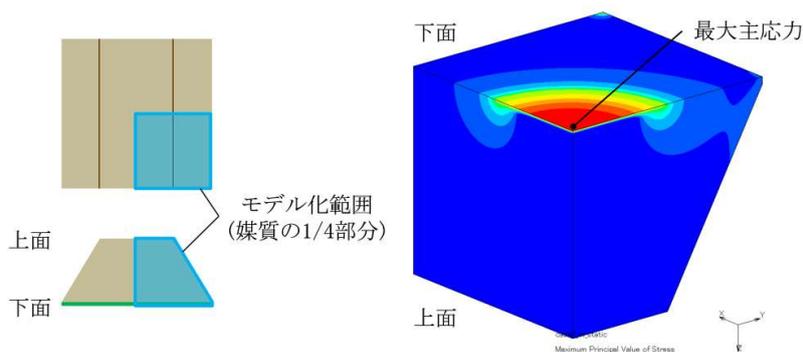


図 2.3.2.8-1 媒質の解析モデル

熱応力解析の結果から、10kWレーザー発振方式における最大主応力は、1kWレーザー発振総合試験時より小さいと予測される。1つの要因として、励起光源のフラットトップ性があると考えられる。10kWレーザー発振条件での熱応力解析では、過去の三菱重工業(株)社内での試験に基づいた、よりフラットトップに近い条件を用いた。一方、1kWレーザ

一発振総合試験ではガウシアンビームに近い状態であったため、最大主応力が大きくなつたと考えられる。

(4) 冷却ノズルの基本構造

冷却ノズル構造は、1kW 級レーザー試験にて標準ノズルとして採用した単孔ノズル構造を採用する。ただし、流量、冷却範囲に応じて寸法は変更する。

(5) ノズル運転条件

(a) 流量

運転条件と冷媒の流量の関係を図 2.3.2.8-2 に示す。設計最大流速 (25m/s) における最大流量は、Case01 : 289L/min、Case02/03 : 577L/min となる。実際の機器選定では、少し余裕をみて本流量の 1.5 倍以上の流量 (それぞれ 434 L/min、866L/min) が出せるポンプを選定する。

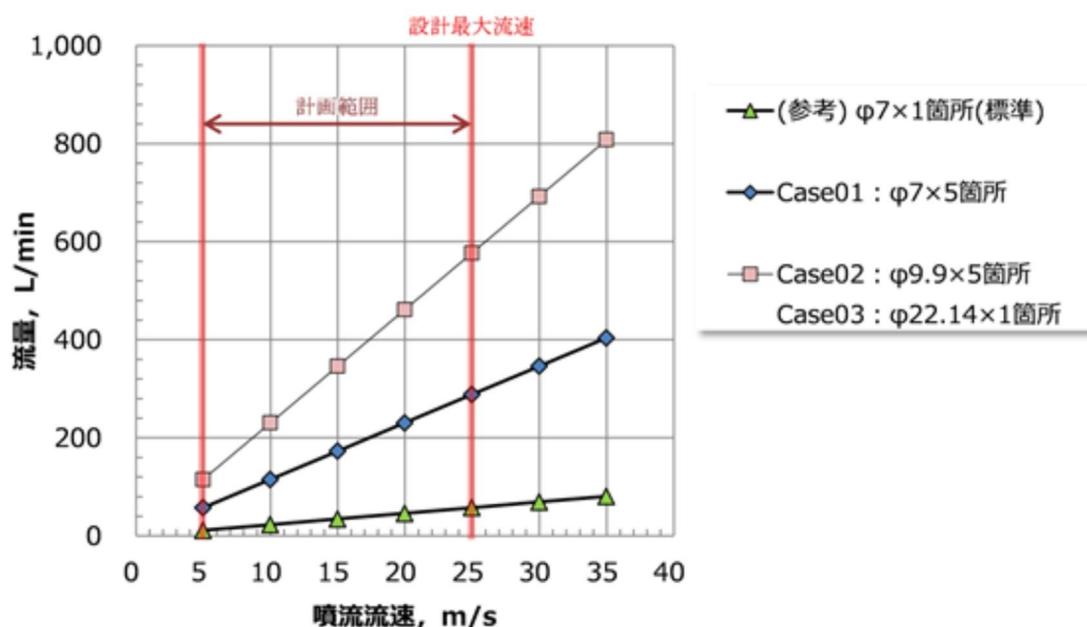


図 2.3.2.8-2 運転条件と冷媒流量

(b) 圧力損失

噴出流速における冷却水の吐出圧力 (損失ヘッド) を図 2.3.2.8-3 に示す。吐出流速 25m/s 時には 49.6mH₂O の吐出圧力が必要となる。実際の機器選定では、少し余裕をみて本圧損の 1.5 倍以上の揚程 (=74.4mH₂O) が出せるポンプを選定する。

※ポンプ選定の際には、本値にポンプとノズル間の圧損を考慮して、吐出圧を満足するようにポンプを選定する。

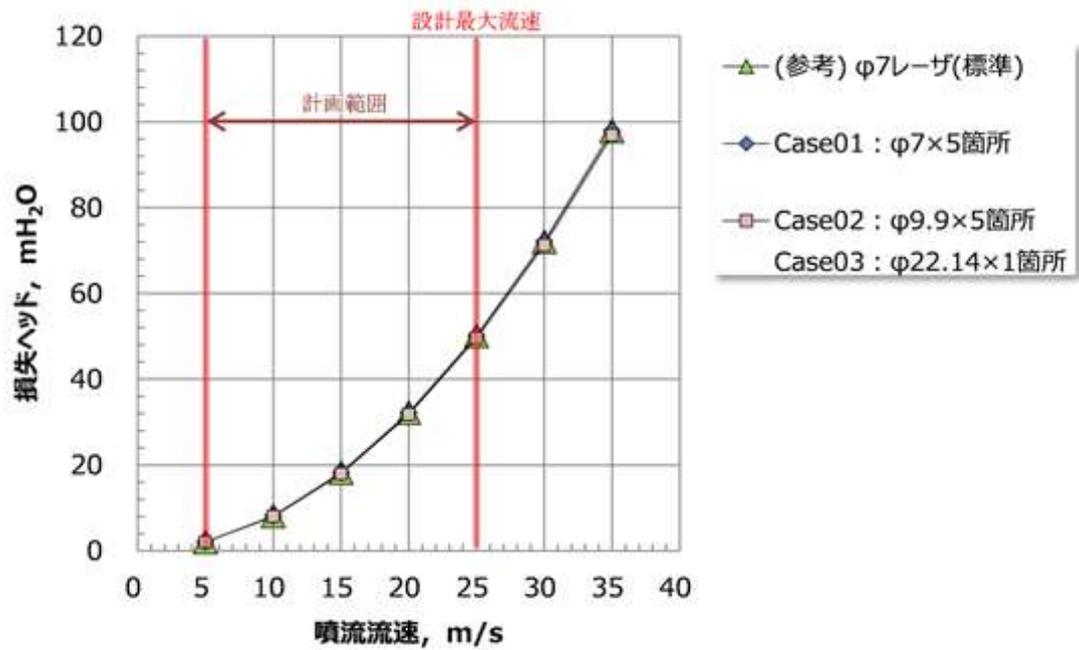


図 2.3.2.8-3 ノズル部の圧力損失

(6) 冷却システムの主要緒元

Case01 の冷却装置について、冷却装置の系統図を図 2.3.2.8-4、基本仕様をまとめたものを表 2.3.2.8-5 に示す。冷却装置の主要機器である循環水ポンプ 1 には、(5) で検討した仕様を満たすポンプ（参考例）として(株)荏原製作所の 80MS6622B があり、市販品で対応することが可能である。

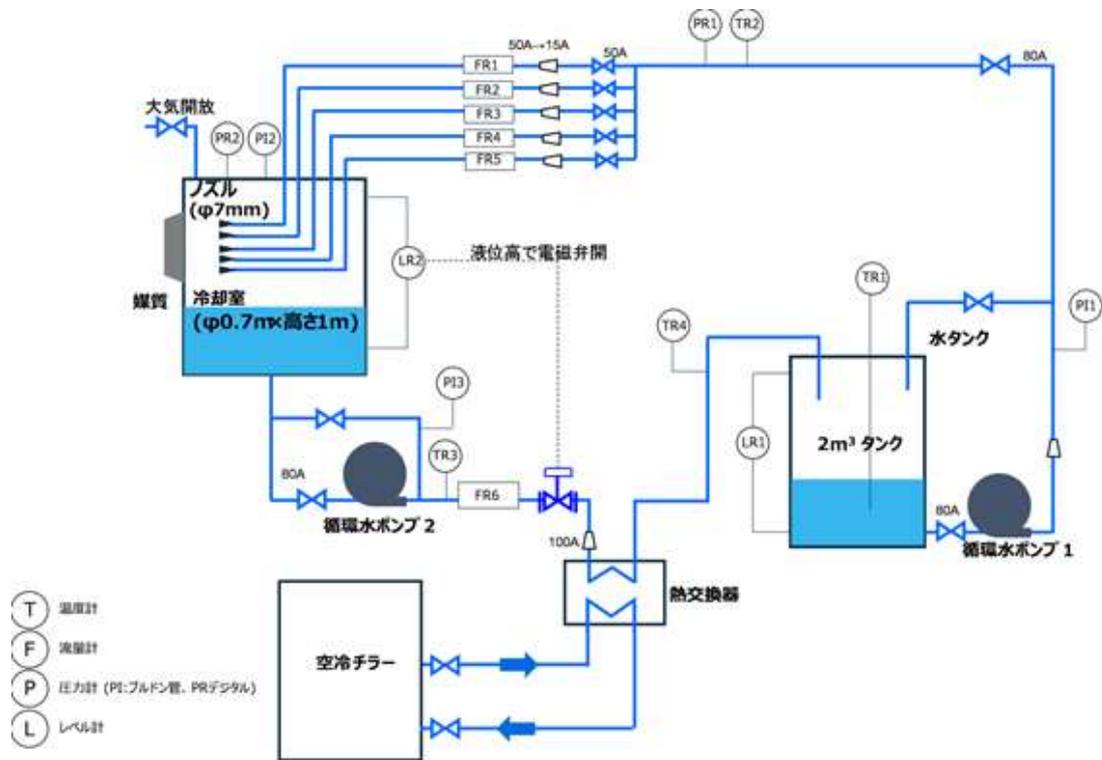


図 2.3.2.8-4 冷却装置の系統図 (Case01)

表 2.3.2.8-5 冷却装置の基本仕様 (Case01)

項目	基本仕様	備考
冷却方式	衝突噴流冷却	—
冷媒種類	水	—
冷媒温度	5°C～常温	—
冷却室の圧力	大気圧	—
噴流速度	5～25m/s	—
ノズル直径	φ 7mm	表 2.3.2.8-2 より
ノズル本数	5 本	表 2.3.2.8-2 より
冷媒最大流量	434L/min	最大流量の 1.5 倍の値
最大揚程	74.4mH ₂ O (0.73MPa)	最大圧損の 1.5 倍の値

(7) まとめ

- 高出力化（10kW 級のレーザー）の実現に向けた基礎的な知見を得るため、10kW 級レーザーに必要な冷却システムの主要緒元（噴流速度等）について検討を行った。
- 発熱による媒質の応力については、2018年度に行った1kW レーザー発振総合試験条件を基に熱応力解析を行った結果と比較し、相対的に10kW レーザー発振方式（Case01）での最大主応力の方が小さいと予測されることが分かった。
- 10kW レーザー発振方式（Case01）は、冷却装置を市販品で構成することが可能であることを確認した。

2.3.3 プロジェクトの総合的推進

月に一度を基本とした、参画各機関が参加する研究開発連絡会を企画、開催した(計8回)。研究の推進状況を確認しつつ、分担研究機関との連携の強化やプロジェクト全体の運営の円滑化のための調整、研究調査を実施した。

3. 成果の外部への発表及び活動

本期間中に以下に示す国際および国内学会発表を行い、研究成果を報告した。また、本研究機関が主催する研究成果報告会において本プロジェクトの成果を発表すると共に、機関紙「レーザークロス」において研究成果を報告するなどの外部に向けた活動を行った。

3.1 学会発表(4件) :

3.1.1 国際学会(2件、ポスター発表)

- 1) M. Fujita, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, D. Li, S. Motokoshi, Y. Izawa, S. Nishikata, T. Morioka, K. Hamamoto, H. Ikebuchi, Y. Ohtani, T. Kaneko, H. Daigo, “Zero-phonon line pumped Yb:YAG TRAM laser oscillator with direct jet impingement cooling”, SPIE Photonic West 2019, 2-7 Feb. 2019, San Francisco, USA.
- 2) H. Chosrowjan, S. Taniguchi, M. Fujita, D. Li, S. Motokoshi, Y. Izawa, S. Nishikata, T. Morioka, K. Hamamoto, H. Ikebuchi, Y. Ohtani, T. Kaneko, H. Daigo, “Development of kW-class Yb:YAG TRAM CW Laser Oscillator with Direct Jet impingement Cooling”, The 8th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2019), 22-26 April 2019, Yokohama, Japan.

3.1.2 国内学会(2件、口頭発表)

- 1) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、藤田雅之、李大治、本越伸二、井澤靖和、西方伸吾、森岡朋也、濱本浩一、池淵博、大谷雄一、金子毅、醍醐浩之、
「ゼロフォノンライン励起 Yb:YAG TRAM レーザーの出力特性」、第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月18-21日、名古屋国際会議場(名古屋市)
- 2) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、藤田雅之、李大治、本越伸二、井澤靖和、西方伸吾、森岡朋也、濱本浩一、池淵博、大谷雄一、金子毅、醍醐浩之、
「水衝突噴流冷却を用いた Yb:YAG TRAM レーザーの出力特性」、第66回応用物理学会春季学術講演会、2019年3月9日-12日、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都)

3.2 外部発表活動（3件、口頭発表）

- 1) ハイク コスロービアン、谷口誠治、藤田雅之、李大治、本越伸二、井澤靖和、西方伸吾、森岡朋也、濱本浩一、池淵博、大谷雄一、金子毅、井上直樹、醍醐浩之、「ジェット水流で熱制御！常温駆動高出力レーザーの開発」、レーザー技術総合研究所平成29年度研究成果報告会（ILT2018）、2018年7月20日、千里ライフサイエンスセンター（吹田市）
- 2) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、李大治、本越伸二、藤田雅之、井澤靖和、西方伸吾、森岡朋也、濱本浩一、池淵博、大谷雄一、金子毅、醍醐浩之「パワーレーザー開発への取り組み ～ジェット水流冷却 kW 級 Yb:YAG レーザー開発～」、オープンセミナー「社会を変えるパワーレーザー ～レーザー加工から インフラ診断まで～（ILT2018 成果報告会）」、2018年11月13日、科学技術館（東京都）
- 3) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、藤田雅之、李大治、本越伸二、井澤靖和、西方伸吾、森岡朋也、濱本浩一、池淵博、大谷雄一、金子毅、醍醐浩之、「ゼロフォノンライン励起 Yb:YAG レーザーの出力特性」、レーザー学会第527回研究会「新レーザー技術」、2018年12月11日、高知市文化プラザカルポート(高知市)

3.3 著作（6件）

- 1) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、藤田雅之、李大治、本越伸二、井澤靖和、「ゼロフォノンライン励起 Yb:YAG レーザーの発振特性」、ILT2018 年報、2018.
- 2) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、藤田雅之、李大治、本越伸二、井澤靖和、「水衝突噴流冷却法を用いた常温駆動高出力 Yb:YAG レーザーの開発」、ILT2018 年報、2018.
- 3) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、藤田雅之、李大治、本越伸二、井澤靖和、西方伸吾、森岡朋也、濱本浩一、池淵博、大谷雄一、金子毅、醍醐浩之、「ゼロフォノンライン励起 Yb:YAG レーザーの出力特性」、レーザー学会第527回研究会報告「新レーザー技術」、pp. 29-34、2018.
- 4) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、藤田雅之、李大治、本越伸二、「常温動作 Yb:YAG TRAM レーザーの出力特性」、レーザークロス No. 361、2018年4月号、pp. 1-3
- 5) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、藤田雅之、李大治、本越伸二、「水ジェット冷却法を用いた高出力 Yb:YAG レーザーの開発」、レーザークロス No. 368、2018年11月号、pp. 1-3
- 6) 谷口誠治、ハイク コスロービアン、藤田雅之、李大治、本越伸二、「常温動作高平

4. まとめ、今後の予定

- 2017 年度に噴流冷却およびゼロフォノンライン (ZPL) 励起光源を用いたレーザー発振試験を実施し、発振しきい値が最も低く、スロープ効率は最も高い Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM を kW 級レーザー発振総合試験に用いる媒質に選定し、2016 年度に構築した出力予測モデルを用いて kW 級高出力スケーリングを行った。励起面積を 0.2cm^2 以上とするため、励起ビーム径は $\phi 6\text{mm}$ (0.28cm^2) または $\phi 7\text{mm}$ (0.39cm^2) とした。その結果、励起面積を拡張した条件では、励起吸収パワーを約 2kW とすることで 1kW の出力が得られる可能性があることがわかった。
- レーザー発振総合試験に用いるレーザー媒質の低い光吸収率を補償するため、新たに多段励起方式を導入し、2 段励起光学系を構築してレーザー発振試験を行いその特性について検討した。その結果、1.8 kW 励起時で比較すると、2 段励起の方が出力は約 1.5 倍増加することが明らかとなり、高出力化に対する多段励起方式の有用性が検証された。
- 1kW を越える出力を実証するため、Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM を用いて 4 段励起方式によるレーザー発振総合試験を行った。その結果、最大 1.07kW を出力し、1kW を越える出力が実証された。スロープ効率は 60% であり、冷却性能が向上したことにより高励起条件においても高い発振効率が保持できた。
- 多段励起により媒質の光吸収率を高めることが可能となったことから、当初の計画にはなかった Yb 濃度 9.8%-層厚 0.2mmTRAM を用いてレーザー発振試験を行った。その結果、最大で 1.03kW の出力が得られ、2 種の媒質で 1 kW を越える出力を実証できた。
- レーザー発振総合試験により得られた kW 出力のレーザー特性に基づき、出力予測モデルを用いて 10kW 出力のためのスケーリングを行った。その結果、励起ビーム径を $\phi 2\text{cm}$ 、吸収パワー 25kW で 10kW を越える出力が得られると予測された。この時の媒質温度は約 140°C であり、1kW 出力時の媒質温度と同様である。多段励起方式を用いることで、10kW の出力に必要な入力値は 30kW まで低下させることが可能となる。940nm 励起と同じ条件で励起をゼロフォノンラインに変更した場合の出力特性を計算した。その結果、10kW の高出力条件においてもゼロフォノンライン励起の方が出力特性に有利に働くものと予測された。
- 2018 年度は、2017 年度に試作した衝突噴流方式の冷却装置について改良を行い、レーザー発振総合試験で用いた。
- 2017 年度に実施の冷却性能評価試験等で得たデータを元に検討した冷却条件を、

レーザー発振総合試験において噴流速度 17m/s 以上での適用を目標に、冷却系統各部の見直し、改良を必要に応じて実施した。

- ・昨年度、改善点として挙げた噴流の乱れに関する対策として、ホルダ形状の改良を実施した。
- ・ホルダ形状の改良による排水性の向上は、冷却面温度を約 12℃低下させる効果があることを確認した。 [冷却条件：冷媒温度 22.6℃(平均)、噴流速度 17m/s]
- ・噴流速度を約24m/sまで増加した場合、冷却面温度が98.4℃へ低下（噴流速度17m/sに比べて11℃低下）できることを確認した。 [冷却条件：冷媒温度23.4℃(平均)]
- ・更に、冷媒温度を6.9℃へ低下させた場合、冷却面温度が77.6℃まで低下（噴流速度 17m/s、常温水条件に比べて31.8℃低下）できることを確認した。
- ・さらなる高出力化（10kW 級のレーザー）の実現に向けた基礎的な知見を得るため、10kW 級レーザーに必要な冷却系統の主要緒元（噴流速度等）についても検討を行った。
- ・発熱による媒質の応力については、2018年度に行った1kW レーザー発振総合試験条件を基に熱応力解析を行った結果と比較し、相対的に 10kW レーザー発振方式 (Case01) での最大主応力の方が小さいと予測されることが分かった。
- ・10kW レーザー発振方式 (Case01) は、冷却装置を市販品で構成することが可能であることを確認した。

参考文献：

- (1) 日本機械学会編、沸騰熱伝達と冷却、日本工業出版（1989）
- (2) 山神、高温鋼板の円形水噴流冷却のVOFシミュレーションと検証実験、東京大学修士論文（指導教官：庄司正弘 教授）(2003)
- (3) 白岩 他、沸騰冷却における熱流束、鉄と鋼 57 第3号、(1971)
- (4) 田中 他、高温鋼板の水ジェット冷却に関する研究 三菱重工技報、第3巻-第7号 (1966)
- (5) ジャパンセンサー(株) 黒体塗料 JSC-3号
- (6) 日本機械学会、伝熱工学資料改訂第4版(1986)

参考文献

- 1) D. C. Brown, V. A. Vitali, *IEEE J. Quantum Electronics*, **47**, 3-12, 2011.
- 2) J. Koerner, C. Vorholt, H. Liebetrau, M. Kahle, D. Kloepfel, R. Seifert, J. Hein, M. C. Kaluza, *J. Opt. Soc. Am. B*, **29**, 2493-2502, 2012.
- 3) J. Dong, M. Bass, Y. Mao, P. Deng, F. Gan, *J. Opt. Soc. Am. B*, **20**, 1975-1979, 2003.
- 4) D. S. Sumida, T. Y. Fan, *OSA proceedings on Advanced Solid-State Lasers 1994*, **20**, 100-102, 1994.

- 5) ジャパンセンサー(株) 黒体塗料JSC-3号
- 6) 日本機械学会、伝熱工学資料改訂第4版(1986)