

## 伝導冷却型 4 watt Nd:YAG レーザの 試作と実験結果

Experiment result of conductive cooled 4 watt Nd:YAG laser

○ 岸 俊一\*, 佐々木康祐\*<sup>†</sup>, 佐藤 篤\*, 浅井和弘\*, 水谷耕平\*\*, 板部敏和\*\*  
Shun-ichi Kishi\*, Kosuke Sasaki\*<sup>†</sup>, Atsushi Sato\*, Kazuhiro Asai\*, Kohei Mizutani\*\*, Toshikazu Itabe\*\*

\*東北工業大学, \*\*通信総合研究所, <sup>†</sup>現在、日本光電(株)

\*Tohoku Institute of Technology, \*\*Communications Research Laboratory

### Abstract

We developed a conductive cooled Nd:YAG laser using a triangular prism type laser rod based on a result of pump intensity distribution analysis and that of thermal conductivity analysis. At the maximum pump energy of 314mJ, an output energy of 65mJ, a slope efficiency of 25% and an optical-to-optical efficiency of 21% were achieved. In addition, TEM<sub>00</sub> mode operation ( $M_x^2=1.3, M_y^2=1.15$ ) of 28mJ was obtained.

### 1. はじめに

伝導冷却方式固体レーザーは水冷方式固体レーザーに比べ、①静的冷却が可能、② レーザ装置の小型軽量化が可能、③ 耐環境性がある等の優れた特徴を有している。一般に伝導冷却方式の場合、発熱しているレーザー結晶は高い熱伝導率をもつ金属製のヒートシンク接触させて、そのヒートシンクから放熱が行われている。しかしながら、硬質なレーザー結晶及びヒートシンクの接触面には微小な空気層が生じ易く、それが冷却効率を低下させる原因となる。したがって、接触熱抵抗を低減させるためにレーザー結晶とヒートシンク間に中間材として柔軟なインジウムシートあるいはシリコングリースなどが用いられている。また、レーザー結晶の冷却効率や励起強度分布は、結晶側面の冷却面積、結晶及びヒートシンク形状、LD の配置などに影響されるため、励起ヘッドを設計する際には冷却効率と励起効率を最大にするためのレーザー結晶形状の検討が重要である。

本研究では、伝導冷却方式 Nd:YAG レーザの設計において高い放熱が予想される角柱型レーザー結晶の励起強度分布をコンピュータにより解析した[1]。更に、レーザー結晶とヒートシンク間に用いる最適な放熱用中間材を調べるために真空中での熱伝導実験を行い[2]、これらの結果を基に設計・試作したレーザーの基本的動作特性について報告する。

### 2. 結晶形状の最適化

結晶内の励起強度分布を解析するために、我々は任意形状の結晶に対する光線追跡が可能で且つ解析結果をテキストデータとして取得可能な Lambda Research 社の光線追跡ソフトウェア TracePro を用い、まず四角柱や五角柱などの様々な角柱型ロッド内における励起強度分布解析を行った。解析結果より、他の角柱型レーザー結晶よりも三角柱型レーザー結晶の方が広い冷却面積を有し、マルチモード発振を抑えられる等の利点がある三角柱型レーザー結晶が最適であることが明らかになった。

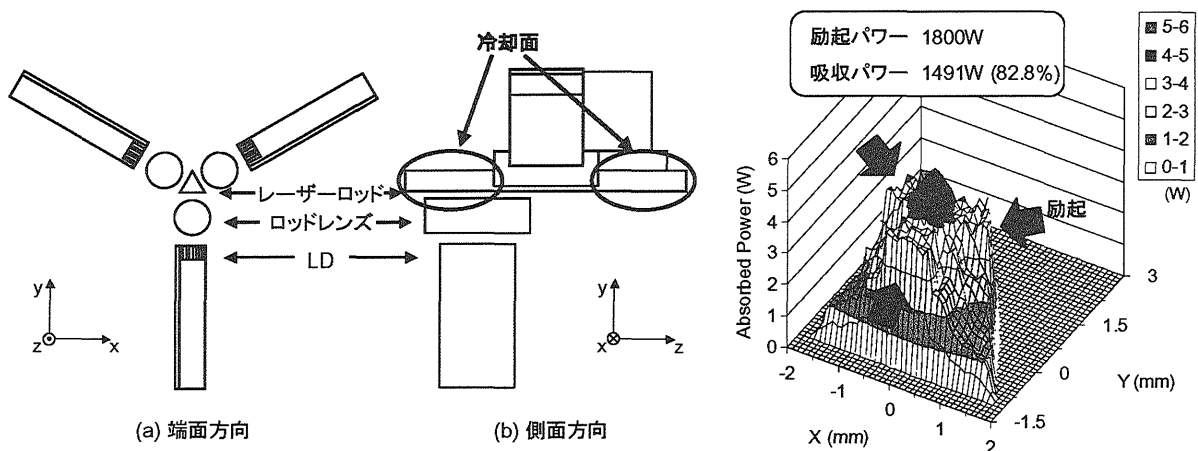


Fig. 1 Schematic cross section of the laser head. Fig. 2 Analytical result of absorbed power distribution.

この解析結果をもとに設計した励起ヘッドの構成を Fig.1 に示す。励起方式はロッド側面 3 方向からの側面励起型で、励起用 LD はロッド内の励起強度分布の偏りをなくすため結晶の長さ方向に 10 mm 間隔でそれぞれ 120 度ずつ回転させて配置した。LD から出射した励起光はロッドレンズにより広がり角を抑えられた後、結晶側面の 1 面からのみ入射され、他の 2 面は結晶を固定すると同時に冷却面として利用されている。Fig. 2 は、三角柱型レーザ結晶(吸収係数  $8\text{cm}^{-1}$ )内での励起強度分布に対する解析結果である。励起パワー1800W の時、1491W(吸収率 82.8%)が効率良く吸収されており、励起強度分布がガウシアン分布の共振器モードとよくマッチングすることが判った。

### 3. 放熱用中間材の熱伝達率測定

Fig. 3 に、熱伝達率測定のプロックダイアグラムを示す。テストベッドは高い熱伝達率( $k=155\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )を有するジュラルミン系アルミニウムで作製した。放熱用中間材は接触熱抵抗を低減するために、 $\pm 5\mu\text{m}$  の精度で研磨加工したテストベッドの接合面に挿入され、トルクドライバーによりトルク値をモニタしながらネジで締め付けられている。テストベッドの上部は出力 20W のラバーヒーターにより温められ、テストベッドの下部にある冷却板の水温は 20 度で一定に保たれている。テストベッド内の熱の流れは熱伝導による一方向のみとし、空気の対流による熱の流れを防ぐために、テストベッドは真空チャンバー内に配置した。テストベッド内のそれぞれの測定点における温度は、白金薄膜温度センサーにより測定し、データロガーで同時にかつリアルタイムにコンピュータに取り込まれソフトウェア上で解析される。

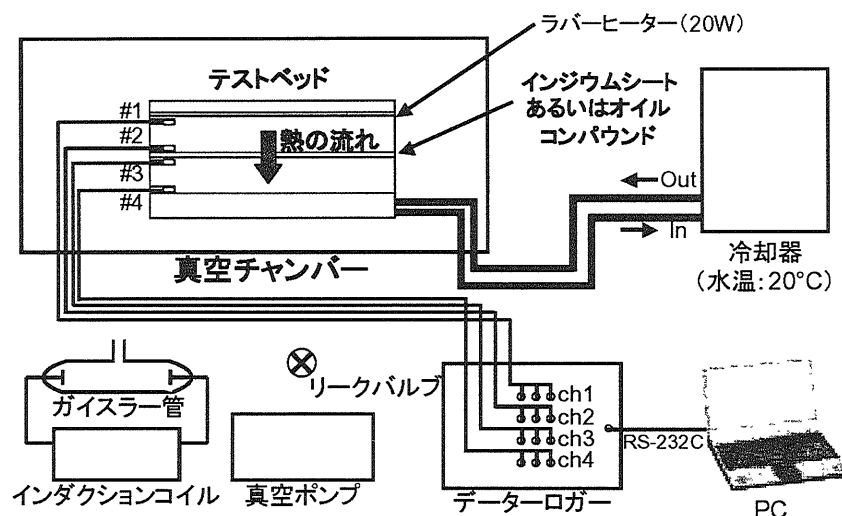


Fig.3 Block diagram of measurement of thermal conductivity.

Fig. 3 の構成の下、様々な条件について中間材の熱伝達率測定の実験を行った。測定された温度差  $T_H - T_L$  は誤差を多く含んでおり、その測定誤差は熱伝達率の計算値に大きく影響するため、熱伝達率は最小二乗法によりフィッティングした後  $T_H - T_L$  を次式に代入し求めた。

$$h = -k \frac{dT}{dy} \frac{1}{T_H - T_L} \quad (1.1)$$

ここで、 $k$  は熱伝達率、 $dT/dy$  は温度勾配、 $T_H - T_L$  は放熱用中間材間の温度差である。Fig. 4 は中間材の厚みを  $70\mu\text{m}$  一定とした場合における熱伝達率の理想値と実験値の比較を示す。Fig. 4 に示されるように、熱伝達率が一桁異なる中間材では、締め付けトルクを高めることによりほぼ同程度の熱伝達率が得られることがわかった。インジウムシートでは実験値と理想値の差が大きいが、オイルコンパウンドでは理想値に近い値が得られた。これはオイルコンパウンドがグリス状であるため、インジウムシートよりもテストベッドとの密着度が高かったと考えられる。オイルコンパウンドでは、低い締め付けトルクにおいて  $h \approx 10 \times 10^3 \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  とインジウムシートに比べて高い熱伝達率が得られた。しかしながら、オイルコンパウンドは真空中でのアウトガスの問題他、励起光の吸

収で局所的な硬化による歪みが生じる可能性があると言われていたため、中間材として使用することはできない。以上の検討の結果、本研究では放熱用中間材としてインジウムシートを用いて励起ヘッドの試作を行った。

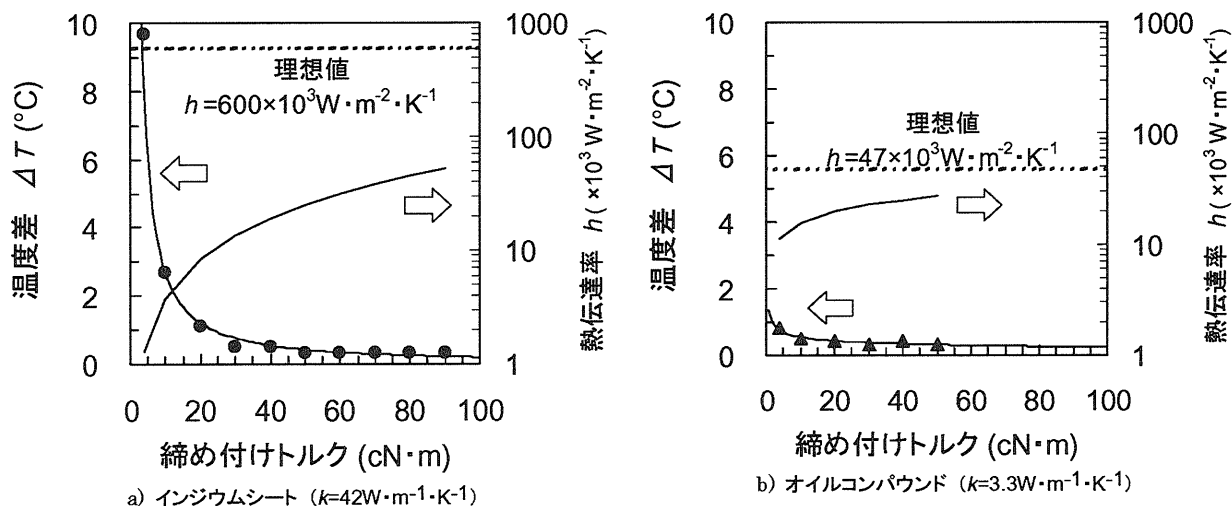


Fig. 4 Experimental results of thermal conductivity of In sheet and Oil compound.

#### 4. 励起ヘッドの設計・試作

Fig.5 に、三角柱 Nd:YAG ロッドを示す。寸法は高さ 3mm、幅 3.46mm、長さ 40mm である。Nd イオンドープ率はロッドの側面付近での吸収率を高めるために 1.4at.% とした。ロッド側面は三角柱の頂点付近での励起光の吸収を避けるために  $\lambda/10$  の精度で研磨されており、両端面は波長 1064nm の AR コーティングが施されている。

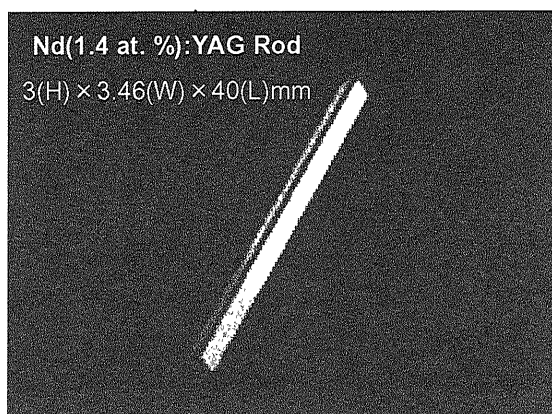


Fig.5 Triangular prism type laser rod.

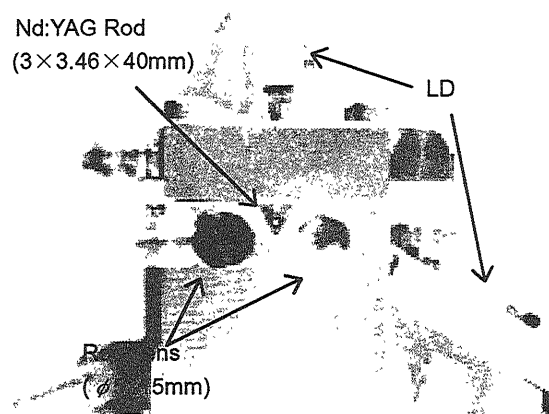


Fig.6 Photograph of pumping head.

Fig.6 は、試作した励起ヘッドである。励起ヘッドはジュラルミン系アルミニウムで作製されている。レーザロッドは 3 個のヒートシンクにより固定され、レーザロッドに接するヒートシンク面は  $\pm 5\mu\text{m}$  精度で研磨加工されている。励起用 LD(励起波長 805nm、パルス幅 200  $\mu\text{sec}$ ) は Thales Laser Diodes 社製 Q-cw LD(TH-Q1406-A) を 3 個用いた。そして、レーザロッド中心での励起強度分布を

高めるための集光用ロッドレンズ( $\phi 5 \times 15 \text{mm}$ )と共に LD は Fig.1 に示されるような側面励起型の構成で配置された。レーザロッドとヒートシンクの接合面に用いる放熱用中間材にはインジウムシート(厚さ  $50 \mu\text{m}$ )を使用した。更に、トルクドライバーで締め付け用の M2 六角穴付ボルトを使用してトルク値  $1.5 \text{cN}\cdot\text{m}$  で均等に締めて接触面の密着度を高めた。

## 5. 実験結果

Fig.7 に、入出力特性を示す。使用した共振器は長さ  $25 \text{cm}$  で平面出力鏡( $R=70, 50, 30\%$ )及び平面全反射鏡で構成されている。ここで、横軸はレーザロッドに入射する(ロッドレンズを通過後)励起エネルギー、縦軸は出力エネルギーである。LD の波長は温度制御により  $805 \text{nm}$  一定に保たれている。結晶のヒートシンク温度  $18^\circ\text{C}$ 、繰り返し周波数  $60 \text{Hz}$  の時、励起エネルギー  $314 \text{mJ}$  に対して最大出力エネルギー  $65 \text{mJ}$ (マルチモード)が達成され、スロープ効率と光-光変換効率はそれぞれ  $\eta_{\text{slope}}=25\%$ 、 $\eta_{\text{opt}}=21\%$  が得られた。更に、 $\text{TEM}_{00}$  モード発振を得るために共振器長を  $1 \text{m}$  としてナイフエッジ法を用いて  $M^2$  を測定した結果を Fig.8 に示す。ここで、横軸はビームウエストからの距離、縦軸はスポットサイズであり、共振器内には三角柱の頂点付近でのレーザ発振を抑えるために、アパーチャー( $\phi 2 \text{mm}$ )が配置されている。繰り返し周波数  $60 \text{Hz}$ 、出力エネルギー  $28 \text{mJ}$  時において、 $M_x^2=1.3$ 、 $M_y^2=1.15$  が得られ  $\text{TEM}_{00}$  モードに近い高いビーム品質が確認された。

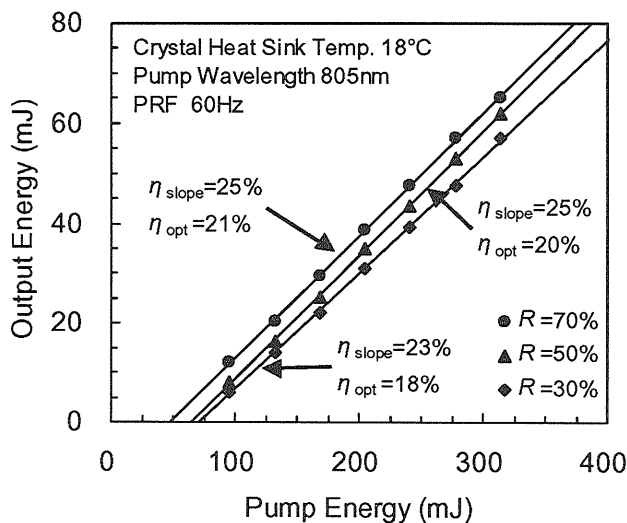


Fig. 7 Output energy versus pump energy.

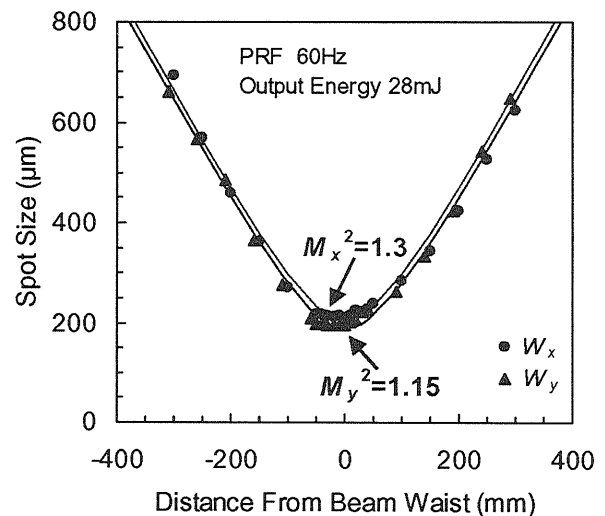


Fig. 8 Measurement of beam spot size.

## 6. おわりに

本研究では、任意結晶形状に対する励起強度分布のシミュレーション及び冷却効率を高めるための放熱用中間材(インジウム及びオイルコンパウンド)を用いた基礎的熱伝導実験を行い、それらの結果をもとに設計・試作したレーザは高効率且つ高ビーム品質の発振が可能であることを明らかにした。

## 参考文献

- [1]佐々木 他, 第 49 回応用物理学関係連合講演会,30-ZG-7(2002).
- [2]佐々木 ,岸 他, 第 57 回応用物理学会東北支部学術講演会,6pB4,(2002).
- [3]岸 ,佐々木 他, 第 57 回応用物理学会東北支部学術講演会,6pB5,(2002).