

Nd:YAG Single Crystal と Nd:YAG Ceramics の熱伝導率測定と その比較

植田研究室 高市 和則

1 実験背景・目的

近年になって、高透光性の YAG (Yttrium Aluminum Garnet, $Y_3Al_5O_{12}$) セラミックスの作成が可能となり、セラミックスでもレーザー発振が出来るようになった。励起時のレーザー媒質内の温度分布により、媒質内にサーマルストレスが生じ、その結果、熱レンズや熱複屈折が起こる。熱伝導率はレーザー媒質固有の熱的性質を示す重要なパラメータである。本研究では、新しい製法によって作成された Nd:YAG セラミックスの熱伝導率を測定し、Nd:YAG 単結晶のものと比較した。

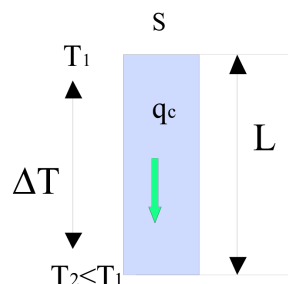


図 1: 一次元の平行熱流

2 熱伝導率について

2.1 Fourier の法則

熱伝導率は Fourier の法則によって定義されている [1]。Fourier の法則は、単位時間当たりの試料中を流れる熱流束を q_C 、試料の断面積を S 、熱伝導率を k とすると、

$$q_C = -kS \nabla T = -kS \text{grad}T \quad (1)$$

となる。また、図 1 のように一次元の平行熱流で考えると、

$$q_C = -kS \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

となる。式 (2) は、定常状態で、 $T_2 > T_1$ とすると、

$$\frac{\Delta T}{q_C} = \frac{T_2 - T_1}{q_C} = \frac{L}{kS} \quad (3)$$

と書ける。

2.2 発熱体の温度変化について

断面積 S 、長さ L 、熱伝導率 k の試料が、上端で熱容量 C_H の発熱体に、下端では温度 T_0 の熱浴

に接しているとする (図 2)。発熱体が単位時間当

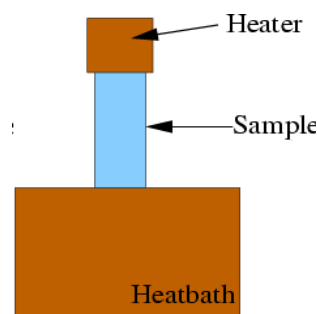


図 2: 測定の基本配置図

たり q_H の熱を発生するとき、発熱体の温度 T は、

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q_H - q_C}{C_H} \quad (4)$$

とかける。また、試料を伝って流れる時間当たりの熱流束 q_C は、式 (3) より、

$$\frac{T(t) - T_0}{q_C} = \frac{L}{kS} \quad (5)$$

となる。

境界条件として、時刻 $t = 0$ ときの発熱体の温度を T_i 、時刻 $t = \infty$ のとき T_s とすると

$$T(t) - T_s = (T_i - T_s) \exp \left[-\frac{kS}{L} \frac{1}{C_H} t \right] \quad (6)$$

$$T_s = T_0 + \frac{L}{kS} q_H \quad (7)$$

という解が得られる。

2.3 熱抵抗

式(3)は、 ΔT を電圧、 q_C を電流、 $\frac{L}{kS}$ を抵抗とすると電気回路と同じように考えることができる(図3)。そこで、試料上端と試料下端での接着によ

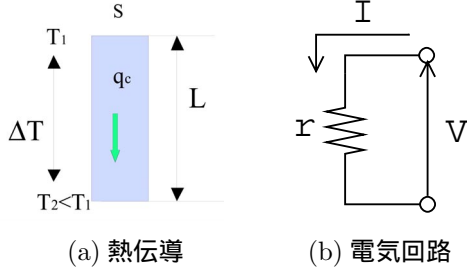


図 3: 熱抵抗

る熱抵抗を考える[2]。上端での熱抵抗を R_{top} 、下端での熱抵抗を R_{bottom} として、系を電気回路の等価回路に置き換えて考える(図4)。この等価回

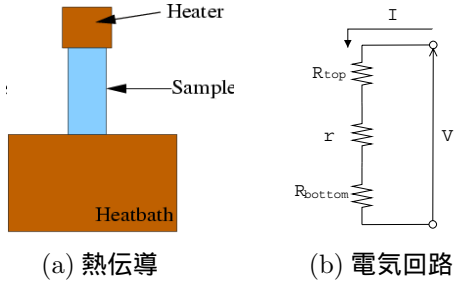


図 4: 接着面での熱抵抗を考慮した場合

路は Ohme の法則により、

$$\frac{V}{I} = r + R_{top} + R_{bottom} = r + R \quad (8)$$

ここで、 $R_{top} + R_{bottom} = R$ である。よって、式(8)を熱伝導の場合に書き直すと

$$\frac{\Delta T}{q_H} = \frac{L}{kS} + R \quad (9)$$

となり、式(9)を用いて式(4)を解きなおすと

$$T(t) - T_s = (T_i - T_s) \exp \left[- \left(\frac{1}{\frac{L}{kS} + R} \right) \frac{1}{C_H} t \right] \quad (10)$$

$$T_s = T_0 + \left(\frac{L}{kS} + R \right) q_H \quad (11)$$

となる。

3 実験装置

測定に用いた試料は、1.0@%Nd:YAG Ceramics ($\phi 3.99 \times 8.73$ [mm])、0.9@%Nd:YAG Single Crystal ($\phi 3.99 \times 8.73$ [mm]) である。

また、熱浴、発熱体には、熱伝導率が高い金属である銅を用いた。発熱体、熱浴の温度測定は、アルメルクロメル熱電対を用い、デジタルボルTMeterで行った。熱電対素線は $\phi 0.1$ [mm] のものを用いた。発熱体と試料、試料と熱浴との接着には Ag ペーストを用いた。

実験の装置は、図5にある通りである。発熱体の加熱は、発熱体を半導体レーザー(波長: 808 [nm]、1 [W])で照射して行った。また、装置付近の風に

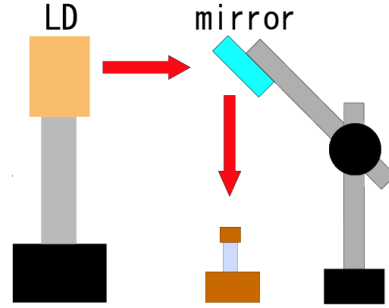


図 5: 実験装置図

よる影響を除くために、装置を囲った。

4 接触面の熱抵抗測定

熱抵抗の値を調べるために、熱伝導率が既知のアルミニウム ($\phi 4.0 \times 10.1$ [mm]) を用いて、発熱体の温度変化を測定した。

LDのパワーが P のとき、発熱体の単位時間当たり発熱量 q_H を

$$q_H = \alpha P \quad (\alpha = \text{const.}) \quad (12)$$

と仮定すると、 $T_i = T_0$ のとき、式(10)と式(11)は

$$\begin{aligned} \Delta T(t) &= T(t) - T_i \\ &= \left[\left(\frac{L}{kS} + R \right) \alpha P \right] \exp \left[- \left(\frac{1}{\frac{L}{kS} + R} \right) \frac{1}{C_H} t \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$T_s = T_0 + \left(\frac{L}{kS} + R \right) \alpha P \quad (14)$$

となる。

装置内の温度は 290[K]、熱浴の温度 $T_0 = 290$ [K]、発熱体の温度 $T_i = T_0 = 290$ [K] という条件下で測定を行った。このときミラーなどでのロスのため $P = 0.69$ [W] であった。測定結果は、図 6 に描く。式 (13) によるフィッティングから、 α ,

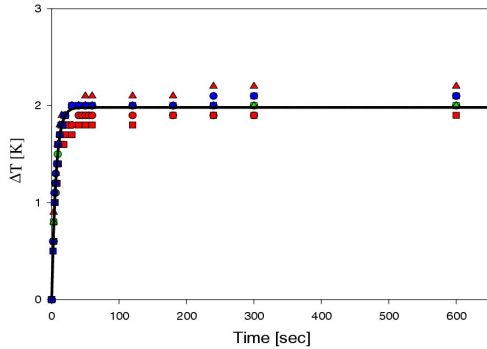


図 6: 発熱体の温度変化 : アルミニウム at 装置内の温度 290[K], $P = 0.69$ [W]

熱抵抗 R は、

$$\alpha = 0.27 \pm 0.02 \quad (15)$$

$$R = 9.3 \pm 0.9[\text{K T}^{-1}] \quad (16)$$

と分かった。以後、この R を用いて、0.9@%Nd:YAG 単結晶と 1.0@%Nd:YAG セラミックスの熱伝導率を求めた。

5 0.9@%Nd:YAG Single Crystal の熱伝導率測定

0.9@%Nd:YAG Single Crystal($\phi 3.99 \times 8.53$ [mm]) で、発熱体の温度測定を行った。装置内の温度は 290[K]、熱浴の温度 $T_0 = 290$ [K]、発熱体の温度 $T(t = 0) = T_0 = 290$ [K] という条件下で測定を行った。このとき $P = 0.69$ [W] であった。測定結果は、図 7 に描く。式 (13) によるフィッティングから、 α 、熱伝導率 k は、

$$\alpha = 0.241 \pm 0.003 \quad (17)$$

$$k = 10.5 \pm 0.5[\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}] \quad (18)$$

と分かった。

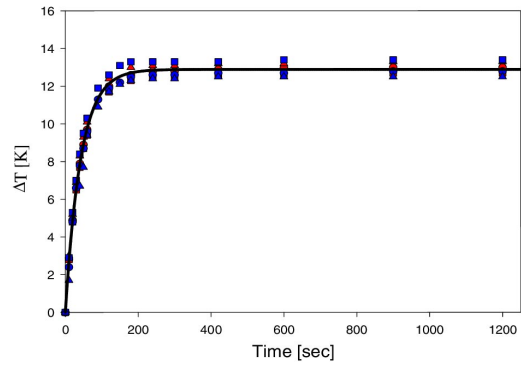


図 7: 発熱体の温度変化 : 0.9@%Nd:YAG single crystal at 装置内の温度 290[K], $P = 0.69$ [W]

6 1.0@%Nd:YAG Ceramics の熱伝導率測定

1.0@%Nd:YAG Ceramics($\phi 3.99 \times 8.53$ [mm]) で、発熱体の温度測定を行った。装置内の温度は 290[K]、熱浴の温度 $T_0 = 290$ [K]、発熱体の温度 $T(t = 0) = T_0 = 290$ [K] という条件下で測定を行った。このとき $P = 0.69$ [W] であった。測定結果は、図 8 に描く。式 (13) によるフィッティング

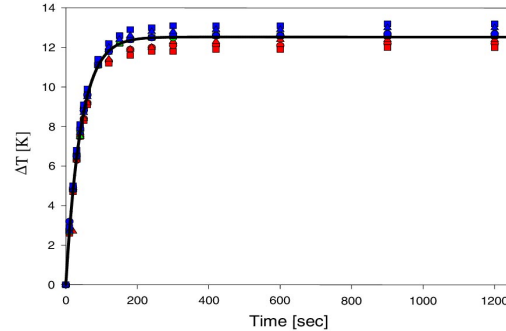


図 8: 発熱体の温度変化 : 1.0@%Nd:YAG ceramics at 装置内の温度 290[K], $P = 0.69$ [W]

から、 α 、熱伝導率 k は、

$$\alpha = 0.249 \pm 0.003 \quad (19)$$

$$k = 10.7 \pm 0.6[\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}] \quad (20)$$

と分かった。

7 気孔率による補正

セラミックスは作成するときに、気孔が入る。それ故、セラミックスは単結晶と気孔との混合物である。YAG ceramics の場合、YAG single crystal が連続相、気孔が分散相、気孔率 p が分散相の体積分率として考えることが出来る。よって、実験結果等から、 $k_{\text{single}} \gg k_{\text{air}} = 2 \times 10^{-2} [\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}]$ (at room temperature) なので

$$k_{\text{ceramics}} \cong k_{\text{single}} \frac{1-p}{1+0.5p} \quad (21)$$

という、Maxwell-Eucken の補正式が得られる [3, 4]。

本実験で用いた 1.0@%Nd:YAG ceramics は気孔率が 1[ppm] なので、式 (21) より、

$$k_{\text{ceramics}} \cong 0.999k_{\text{single}} \approx k_{\text{single}} \quad (22)$$

となり、この程度の気孔率では、気孔によるセラミックスの熱伝導率の低下は十分無視でき、単結晶の熱伝導率と同じと考えてもよい。このことは、実験結果とよく一致している。

8 まとめ

実験結果から、1.0@%Nd:YAG ceramics と 0.9@%Nd:YAG single crystal の熱伝導率は、 $k_{\text{single}} = 10.5 \pm 0.5 [\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}]$ 、 $k_{\text{ceramics}} = 10.7 \pm 0.6 [\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}]$ で、互いに一致した値を示した。

また、1.0@%Nd:YAG single crystal の熱伝導率は、11-14 $[\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}]$ と報告されている [5] ので、それとほぼ一致した値が得られた。

実験結果と今までの議論から、Nd:YAG ceramics と Nd:YAG single crystal とには、熱伝導率に関しては、違いが認められなかった。

このことにより、Nd:YAG ceramics が Nd:YAG single crystal の代用物としての十分なポテンシャルを有しているといえる。

参考文献

- [1] 日本化学会編, 実験化学講座 4 熱・圧力, 第4版 (丸善, 1992).

- [2] B. J. Filla, Rev. Sci. Instrum. **68**, 2822 (1997).
- [3] W. D. Kingery, H. K. Howen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1976).
- [4] ([3] の邦訳本) 小松 和藏, 佐多 敏之, 守吉 佑介, 北澤 宏一, 植松 敬三 共訳, セラミックス材料科学入門 (内田老鶴圃, 1981).
- [5] A. A. Kaminskii, *Springer Series in Optical Science Vol. 14 Laser Crystals: Their Physics and Properties*, 2nd ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1990).