

MgO セラミックスの熱誘起複屈折の評価

量子・物質工学科 植田研究室 黒川裕章

1 . はじめに

セラミックは単結晶と異なり、グレインと呼ばれる微結晶から形成される多結晶体であり、グレイン個々は異なった結晶方位を有しているためセラミックの結晶軸はランダムである。

レーザーセラミックの応用において熱複屈折の空間変動が近年注目を集めている。レーザー媒質長の短い Thin disk laser などでは特に大きな影響を与える可能性がある。

近年開発された MgO セラミックの熱誘起複屈折を測定し、MgO 単結晶と比較した。また、高分解能で場所依存性を測定することにより、グレインの存在による複屈折の変化を評価することを目的とする。

2 . 原理

2.1 熱複屈折

光学的等方性媒質に温度勾配を与えると光弾性効果が起こる。

屈折率は屈折率楕円体で定義される媒体の変化量で表すことができ、屈折率楕円体の変化量を表す係数として ΔB_{ij} を次のように定義する。

$$\Delta B_{ij} = p_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (2.1.1)$$

ただし、 p_{ijkl} : 光弾性定数(四次元のテンソル)

ε_{kl} : 歪 (二次元のテンソル)

この ΔB_{ij} を利用して通常光線の屈折率 n_x と異常光線の屈折率 n_y を表すと

$$n_x = -\frac{1}{2} n_0^3 \Delta B_{xx} \quad (2.1.2a)$$

$$n_y = -\frac{1}{2} n_0^3 \Delta B_{yy} \quad (2.1.2b)$$

となり、屈折率の二軸の方向差を複屈折というので、複屈折は

$$|n_x - n_y| = \frac{1}{2} n_0^3 |\Delta B_{xx} - \Delta B_{yy}| \quad (2.1.3)$$

と表せられる。

2.2 複屈折と偏光解消度

一对の直交する偏光子に挟まれた複屈折板を考える。複屈折板は遅軸および速軸が検光子と 45° となるように配置されている場合を考える。

波長 λ の直線偏光の光が厚さ t の複屈折板を通過する時、位相差 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) \cdot t \quad (2.2.1)$$

となり、出射後のジョーンズベクトルは、

$$\begin{aligned} V &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Delta\phi}{2} & -i \sin \frac{\Delta\phi}{2} \\ -i \sin \frac{\Delta\phi}{2} & \cos \frac{\Delta\phi}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= -i \begin{pmatrix} \sin \frac{\Delta\phi}{2} \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

伝達された光は、水平方向に偏光しており、偏光解消度(入力に対する強度)は、

$$D_{pol} = \frac{I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}} = \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} \quad (2.2.3)$$

となる。

式(2.2.1)と式(2.2.3)より、複屈折と偏光解消度は

$$|B| \equiv |n_x - n_y| = \frac{\lambda}{\pi t} \sin^{-1} \sqrt{D_{pol}} \quad (2.2.4)$$

という関係が成立する。

3 . 実験方法

実験装置の概略図を図 3.1 に示す。クロスニコル法を用いて、MgOによる偏光解消度を測定した。プローブ光にビーム径 8 μ mで単一偏光のHe-Neレーザー($\lambda=632.8$ [nm])を用い、試料にCO₂レーザー ($\lambda=10.6$ [μ m]) 1.1Wを吸収させプローブ光に対して約 45° 入射になるように調整しy方向に温度勾配を与えた。また、偏光解消の場所依存性を測定するために、駆動ステージを用いて温度一様な領域内をx方向に 300 μ mの範囲で移動させ、偏光解消度を測定した。

測定した試料は、グレインサイズが 3 μ m、6 μ m、10 μ m、11 μ m、20 μ m、20 μ m のセラミック 6 種類と結晶面方位が(100)面、(111)面の単結晶 2 種類の計 8 種類で、いずれも矩形形状 (20 × 20 × 0.52[mm]) である。

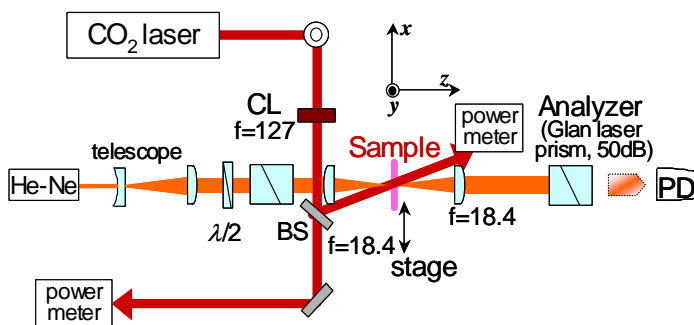


図 3.1 実験装置概略図.

CL:円筒レンズ BS:ビームスプリッター

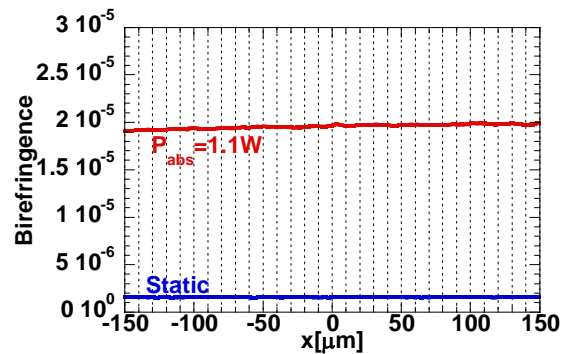


図 4.1 グレインサイズ 3 μ m

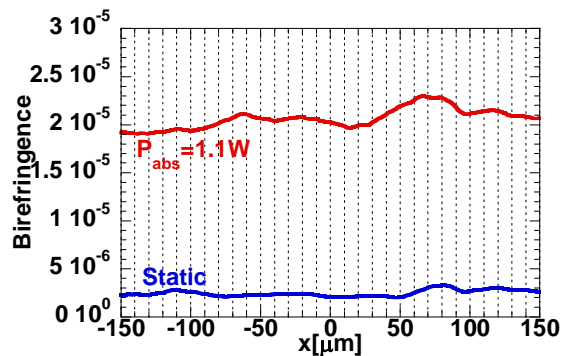


図 4.2 グレインサイズ 20 μ m

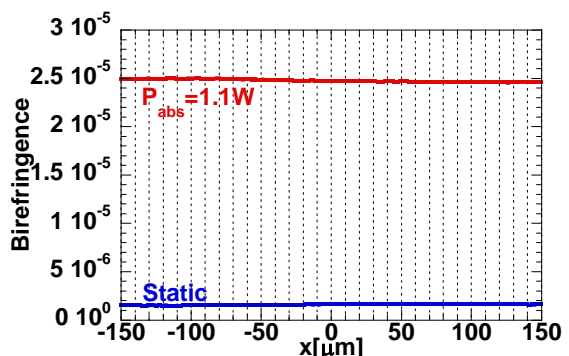


図 4.3 単結晶(100)面

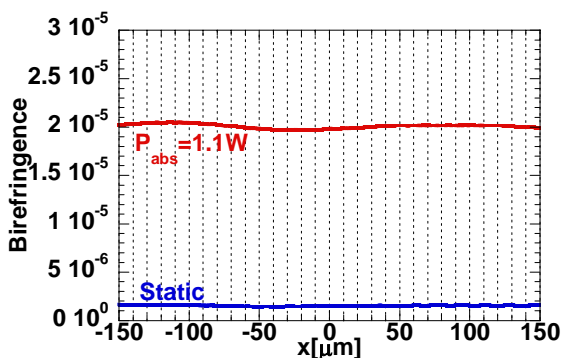


図 4.4 単結晶(111)面

4 . 測定結果

図 4.1 ~ 図 4.4 に複屈折の結果を示す。分解能は $8\mu\text{m}$ である。横軸が測定位置で、縦軸が複屈折の値となっている。

結果に載せていない、グレインサイズ $6\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $11\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ No.2 の結果も図 4.1 や図 4.2 と似た結果が得られた。

5 . 考察

5.1 複屈折のグレインサイズ依存性と結晶面方位依存性

測定した範囲 $300\mu\text{m}$ の静的・熱複屈折の平均値のグレインサイズ依存性と結晶面方位依存性を図 5.1 示す。

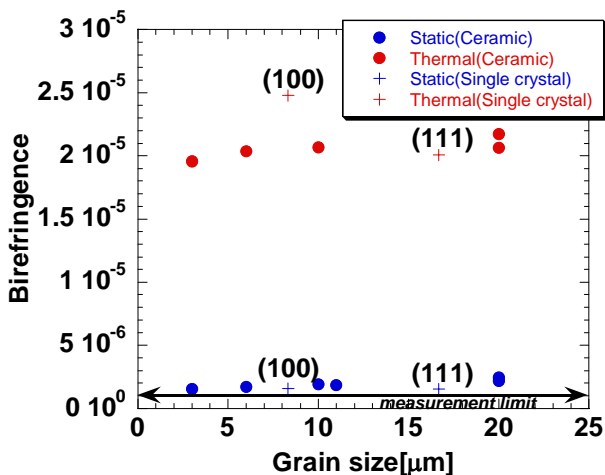


図 5.1 複屈折のグレインサイズ依存性と結晶面方位依存性

静的複屈折は空間分解能 $8\mu\text{m}$ の時、グレインサイズ $20\mu\text{m}$ のセラミック以外は単結晶と有意な差は見られない。しかし、光学的等方性媒質であるならば、静的複屈折は存在しないはずである。本実験では単結晶、セラミックいずれも確認できた。考えられる原因は内部ひずみが存在である。

グレインサイズによらずセラミックの熱複屈折は、単結晶(111)面の値とほぼ等しくなっ

た。これは Nd:YAG の結果と同様になった。本実験のプローブ光の偏光方向回転角の時、単結晶(111)面の熱複屈折は、(100)面より小さくなった。

5.2 理論値との比較

本実験は y 方向のみ温度勾配を与えたので、ひずみが y 方向のみ生じたと仮定する。

式 (2.1.1) と式 (2.1.3) を利用し、(100)面と(111)面の熱複屈折を計算し比較する。(111)面の熱複屈折の計算は、ひずみ行列の座標軸(111)を一度(100)軸に変換し、その(100)軸で ΔB_{ij} を求め、その結果を再び(111)軸に変換させるという方法を使って求めた。

計算すると(111)面は、(100)面の 86% 程の熱複屈折をもつという結果が得られた。範囲 $300\mu\text{m}$ の熱複屈折の平均値で(100)面と他の試料を比較したものを表 5.2 に示す。実験値は理論値と 5% 程のズレがあるが実験誤差範囲だと考えられる。

表 5.2 (100)面との比率

| | | | | |
|------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------|
| Sample | $3\mu\text{m}$ | $6\mu\text{m}$ | $10\mu\text{m}$ | |
| (100)面との比率 | 78% | 82% | 83% | |
| Sample | $11\mu\text{m}$ | $20\mu\text{m}$ | $20\mu\text{m}$ No.2 | (111)面 |
| (100)面との比率 | 85% | 81% | 88% | 81% |

5.3 複屈折と空間変動の N 依存性

空間変動を評価するため、 N というパラメータを用いる。 N はグレインの数の平均値を意味し、試料の厚さ t とグレインサイズ l_g で定義すると次のようになる。

$$N = \frac{t}{l_g} \quad (5.3.1)$$

この N を横軸に、縦軸は測定した範囲 $300\mu\text{m}$ の静的・熱複屈折の標準偏差を平均値で割ったものとして、複屈折と空間変動の N

依存性を図 5.3.1、図 5.3.2 に示す。

静的・熱複屈折いずれも、 N が大きくなるにつれて指数関数的に減少していくと考えられる。静的複屈折の空間変動は、熱複屈折の空間変動に比べて大きくなっているがこれは、静的複屈折が測定限界付近なため、測定誤差も含まれていると考えられる。

熱複屈折の空間変動は、単結晶の空間変動率から $N = 50$ の時、大きく現れていることが分かる。 $N > 50$ にすれば空間変動を抑えることができるであろう。また、 $N > 100$ であれば静的複屈折の空間変動と両方を抑えることができる可能性がある。

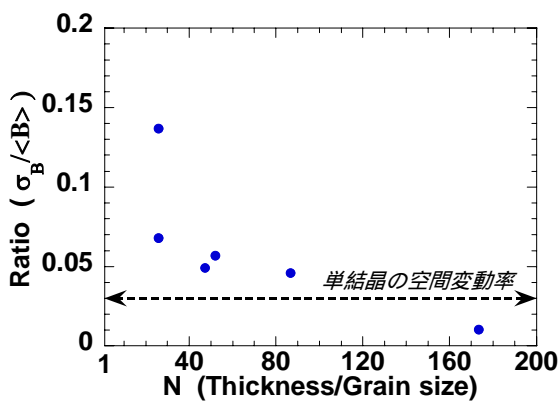


図 5.3.1 静的複屈折と空間変動の N 依存性

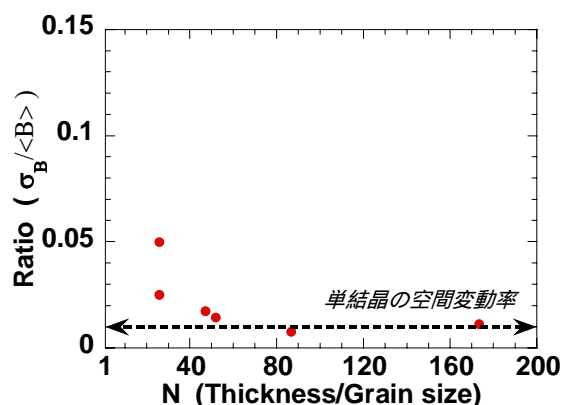


図 5.3.2 熱複屈折と空間変動の N 依存性

6 . 今後の展望

本実験ではCO₂レーザーを用い温度勾配を与えたが、全試料同じように温度勾配を与えられたと仮定して測定したが、実際与えられていたのか不明なままである。そのため、干渉計を組み、干渉縞を画像処理することにより位相変化を抽出し温度勾配を求める。温度勾配が求めればクロスチェックすることも可能になる。

また、熱複屈折とグレインの数の平均値 N の温度勾配依存性を測定する。温度勾配が急になると空間変動がどのように変化していくか測定することにより、用途に合った N の値を見つけることができ、空間変動を抑えることが可能になる。

7 . 参考文献

- [1]E.A.Khazanov, Opt Lett.27,716-718(2002)
- [2]I.Shoji, Y.Sato, S.Kurimura, V.Lupe, T.Taira, A.Ikesue, and K.Yoshida, Opt.Lett.27,234-236(2002)
- [3]W.Koechner and D.K.Rice, "Effect of birefringence on the performance of linearly polarized YAG:Nd lasers," IEEE J.Quantum Electron.QE-6,557(1970)
- [4]W.Koechner "Solid-State Laser Engineering 6th ed." (Springer, Berlin)
- [5]Amnon Yariv 光エレクトロニクス基礎編 多田邦雄・神谷武志 監訳 丸善