

令和元年6月10日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04505

研究課題名(和文) 光導波型相分離シンチレータの規則構造制御による高解像度化と大口径化に関する研究

研究課題名(英文) Study on high resolution and large diameter crystal growth of phase-separated scintillator with light guiding property by controlling the order structure

研究代表者

吉川 彰 (Yoshikawa, Akira)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：50292264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：共晶体を用いた相分離シンチレータにより、 $1\ \mu\text{m}$ の解像度を持つ検出器を具現化することに成功した。GdAlO₃/Al₂O₃を基本組成とし、元素置換による結晶構造変化と各相間で許容される角度誤差を検討し、共晶組成・作製方位等を最適化した。大口径相分離シンチレータをマイクロ引下法およびEFG法により作製する技術を開発し、10 mm角の大口径化を達成した。既存のCCD検出器と組合せたX線位相イメージング検出器を開発し、原理検証までを行った。ミクロンオーダーの超高解像度放射線検出器が実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、光導波性獲得を目標とした、元素置換による構造制御、配向性制御を系統的に研究した。共晶相の微細組織をバルクのスケールで制御するには共晶相図、界面の方位制御、面内温度分布の均質性等が相互に影響しあうため、その体系的な理解は結晶成長研究分野における学術的な意義も大きい。今回開発したX線位相イメージング検出器は従来見えなかった癌病巣、高齢者に患者が多い関節リウマチ・変形性膝関節症における軟骨という軟組織のX線位相イメージングを可能となる装置の実現に繋がり、早期発見により重症化前治療を可能にすることで生活の質(QOL)の向上に資する。

研究成果の概要(英文)： We have studied on phase-separated eutectic scintillator and developed the $1\ \mu\text{m}$ resolution detector. On the basis of GdAlO₃/Al₂O₃ composition, we optimized the eutectic composition and growth direction by considering the crystal structure change with cation substitutions and the acceptable angular errors between each phases. We succeeded to grow phase-separated eutectic crystal with large diameter by the micro-pulling down method and EFG method. X-ray phase-imaging detector combined with a CCD camera was developed and prove our concept "super high resolution using phase-separated eutectic scintillation detector".

研究分野：結晶工学

キーワード：シンチレータ X線検出器 共晶体 結晶成長

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

X線イメージング技術の応用分野は多岐にわたるが、特に医療分野では、癌検診等の生体画像検査の現場で活用されている。今までX線では難易度が高いとされてきた軟組織の可視化に関しても、近年、新たな撮影法としてX線の位相変化を用いる手法が検討されており、日本・ドイツ・スイスにて精力的に研究が行われている。もたらされるメリットは、今までに可視化出来ていなかった軟組織部位の描出が可能となれば、例えば癌、関節リウマチ・変形性膝関節症等の早期発見が可能になり、重症化を回避し、生活の質（QOL）の向上に繋げることができる。しかしながら、現状のX線位相イメージングでは、複数段の吸収格子を用いたモアレ縞を取得しその周期を10倍に拡大して検出することが必要となるため、X線の損失割合は75%以上となってしまう、一般のX線撮影に比べ10倍以上照射線量（2mGy以上）となってしまう。これを解決するためには、X線位相イメージングの撮像性能を維持し、照射線量を改善できる唯一の手段である、直接計測型位相イメージング法の実現が必須である。しかしながら、高精細画像のための高解像度化と低被曝のための高感度化はトレードオフの関係にある。すなわち、X線の検出感度を上げるにはX線の線質に対応した十分なシンチレータ層の厚みが要求されるが、厚いシンチレータは光検出器アレイの受光部に光が到達するまでに広がってしまいボケが発生する。国内外で高い要請がありながらも、これが技術障壁となり、現時点まで位相差の直接計測を阻んできた。現在、柱状Tl:CsIシンチレータを用いた高解像度検出器が市販されているが、解像度が不十分、機械的な強度が弱い等の問題でX線位相イメージング用の検出器としては不相当とされている。一方、本申請の相分離シンチレータは共晶体であり、共晶体は嘗て高温強度材料として検討された歴史がある様に強度は問題無い。また、研究初期の現時点でも数ミクロンのオーダーまで解像度も得られており、X線位相イメージング用の検出器として期待が持てる。

これまでの我々の研究で、シンチレータ相とシンチレーション光を反射させる相から成る共晶体を用いて光導波性に優れた超高解像度（ $10\mu\text{m}$ 以下の識別能）を世界で初めて見出した。これは自己組織的に形成されるシリンダー状構造を有するGAP/ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 共晶体を活用したものである。当該共晶体を大口径化することに成功すれば、 $10\mu\text{m}$ 周期パターンの解像度を必要とされる位相差の直接計測が可能で、十分な感度を有する、直接計測型位相イメージング装置が実現可能となる。 $10[1\text{p}/\text{mm}]$ （ 1mm 内に10本のライン、 $[\text{cyc}/\text{mm}]$ と同義）の条件でのコントラスト伝達関数（CTF, Contrast Transfer Function）を比較すると、Tl:CsIやGOSを用いたX線2次元検出器に比べ、共晶体は3倍高い数値を示した。結晶の厚みが 1mm 以上に増しても光損失が生じないことも確認されており、高いエネルギーのX線も検出可能な超高解像度・高感度X線2次元検出器を実現できる可能性が示されている。また、 $4\mu\text{m}$ という極めて高い解像度を有していることも確認している。

2. 研究の目的

本研究の大目的は共晶体を用いた相分離シンチレータにより、 $1\mu\text{m}$ の解像度を持つ検出器を具現化することである。本提案では光導波性を有する $\text{REAO}_3/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ （RE= Y, La, Gd, Lu, A=Al, Sc, Ga）相分離シンチレータの 10mm 角の大口径化を達成し、既存のCCD検出器と組合せたX線位相イメージング検出器を開発し、原理検証までを行う。具体的には①GdAlO₃（GAP）/ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を基本組成とし、元素置換による結晶構造変化と各相間で許容される角度誤差を検討し、共晶組成・作製方位等を最適化する。②大口径相分離シンチレータを、 $\mu\text{-PD}$ およびEFG法により不規則相なく作製する技術を開発する。③これを用いて $10\mu\text{m}$ 以下の周期パターンが検出可能な超高解像度を高感度で達成し、狭ピッチCMOSセンサと組合せることにより、X線位相イメージング用検出器の試作と実証試験までを行う。成功すればミクロンオーダーの超高解像度X線検出器が実現し、世界初となる直接検出型X線位相イメージング装置の実現への道が拓かれる。

3. 研究の方法

本研究では、光導波性を有する $\text{REAO}_3/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ （RE= Y, La, Gd, Lu, A=Al, Sc, Ga）相分離シンチレータの 10mm 角サイズまでの大口径化を達成し、既存のCCD検出器と組み合わせたX線位相イメージング検出器の原理検証を行った。以下の3課題と研究項目として掲げた。

- (1) 規則構造安定化に向けた、GAP/ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ への添加元素検討
- (2) $\mu\text{-PD}$ 法およびEFG法における大口径化に向けた増幅ダイ形状の検討
- (3) 超高解像度イメージングの実証試験

添加元素による結晶構造、配向性、規則構造の安定性の検討を系統的に行い、共晶体組成を最適化した上で、相分離シンチレータの大口径化に最適な温度勾配、成長速度、ルツボ形状といった育成条件を検討し、CMOSセンサと得られたシンチレータプレートをアッセンブリした検出器を試作し、位相差の直接計測実証までを行うこととした。

(1) 規則構造安定化に向けた、GAP/ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ への添加元素検討

吉川らの開発した $\mu\text{-PD}$ 法という単結晶育成技術は、従来の単結晶作製法である引き上げ法やブリッジマン法と比較して数十倍～数百倍という非常に早い速度で育成可能である点、キャピラリーを用いることで融液の対流を制御し、偏析現象を制御できる点など結晶作製の適用可能範囲が非常に広い結晶作製技術である。 $\mu\text{-PD}$ 法ではルツボ下部に設置した、「ダイ」と呼ばれる融液保持部の形状や増幅ダイを接続する穴の個数を材料に合わせて設計し、最適な固液界面形状を実現することで、角柱状、板状、ファイバー状、パイプ状といった特殊な形状を有する単結晶、共晶体の育成技術を開発し、高温用高強度材料やシンチレータ材料として共晶体の

開発を行ってきた。これまでの検討により、規則構造を有する相分離 GAP/ α -Al₂O₃ 共晶体では、GAP シリンダー方向が GAP (010) 面配向を有し、マトリックス相では α -Al₂O₃ (0001) 面が配向していることが明らかになっている。不規則構造部分は、このような配向関係となっておらず、規則構造特有の配向関係であることも確認できている。このため、 $\langle 0001 \rangle$ 方位の単結晶サファイアを種結晶に用いることで再現性良く、規則構造を有する共晶体の成長が可能となることを確認している。ただし、現状では、面積が数 mm² 程度と、バルク結晶成長技術が未確立であった。また、規則構造内の結晶配向のばらつきは 7° であり、このため大面積に均質かつ安定的に得るためには、結晶相の配向制御を 7° 以内で行う必要があった。一方、GAP/ α -Al₂O₃ 界面では α -Al₂O₃ 側に転移が生じることで格子不整合性を緩和していることを確認されていた。このことは、規則構造の安定化には、GAP および α -Al₂O₃ 双方における格子定数制御により、規則構造の安定性を制御できる可能性を示唆している。このため、GAP および α -Al₂O₃ における Gd サイトへの La, Y, Lu, および Al サイトへの Ga, Sc の置換の組み合わせを検討し、上記不規則領域は極力排除し、規則構造の安定化を図った。具体的には、共晶体作製条件の再現性を確保した後 μ -PD 法を用いた共晶体の作製を行い、各種元素の置換量での共晶体を作製し、結晶構造の変化と共晶体における配向性の違いを、粉末 XRD、TEM、EBSD による分析および結晶構造シミュレーションを駆使し、規則構造特有の 3 次元の配向関係を系統的に調べた。また、元素置換のシンチレータ特性に与える影響も確認し、共晶体作製と評価のフィードバックを迅速に行うことで、規則構造をより安定的に得られる組成を探索した。また、ペロブスカイト構造の安定化には不利な可能性もあるがバンドギャップエンジニアリングによる特性向上の観点から、GAP における Al サイトへの Sc, Ga も検討した。

(2) μ -PD 法および EFG 法における大口径化に向けた坩堝ダイ形状の検討

相分離シンチレータを X 線 2 次元検出器に搭載する際には、実用化時の CMOS センサの有効面積を 10mm 角程度と想定し、撮像視野に対して十分な有効面積を有する 10mm 角の共晶体プレートが必要となる。そこで、上記検討で確認された共晶体組成を基に、大口径化の検討を行った。相分離構造を安定的かつ大面積に得るためには、共晶体作製時の固液界面の平坦化、安定化および面内方向の温度勾配の均一化が重要となる。このため、共晶体作製に用いる、ルツボ形状、ダイ形状、穴数、穴の配置や成長方向での温度勾配を最適化することで、固液界面形状の平坦化と相分離構造安定化を目指した。ルツボの設計においては、実用化段階で必要となる 10mm 角程度の有効面積を持つ CMOS とのアセンブリを目指し、十分な面積を有するダイを設計した。ダイ形状、メルトの濡れ性、重力の影響を考えると、ダイ形状にテーパを持たせることで、固液界面の平坦化は可能であると考えた。メルトの自重による、キャピラリー効果の挙動を考え、 μ -PD 法ではメルト供給穴を外縁部に配置し、中央部に平坦部を確保し、規則構造の安定形成を試みた。EFG 法では無数の微細空孔を有するポーラス状のダイを選択し、空孔の微細化による固液界面の平坦化を検討した。ルツボ・ダイは共晶体の融点を考慮し Ir 製を用いた。5mm² 坩堝における検討結果を踏まえて、7.5mm²、10mm²、20mm² のダイを有する坩堝の 3 条件について検討した。従来 μ -PD 法は、その名前にある通り、大口径の引き下げが実施されたことがなく、10mm² 以上のダイは過去最大級のサイズとなった。また、EFG 法では無数の微細空孔を有するポーラス状のダイを選択し、空孔の微細化による固液界面の平坦化を検討した。ルツボ・ダイは共晶体の融点を考慮し Ir 製を用いた。これらの検討結果より、 μ -PD 法あるいは EFG 法のどちらが最適手法かどうか判断を下した。

(3) 超高解像度イメージングの実証試験

X 線イメージングに十分な視野を確保し CMOS センサとのアセンブリ可能な、1 インチ ϕ 程度の有効面積を確保する共晶体サンプルを加工した後、検出器への使用を想定している CMOS センサーへの貼り合わせ方法等の検出器構成を検討した。検出器構成については、光線追跡シミュレーションにより構造設計し、同時に相分離シンチレータの表面平滑処理と空気が入らないよう接着材料の選定を行った。また、散乱線の影響が出ないよう遮蔽材とシンチレータの厚みを調整した。更に、相分離構造のシリンダー相の周期と解像度依存性を調べた。

4. 研究成果

(1) 規則構造安定化に向けた、GAP/ α -Al₂O₃ への添加元素検討

添加元素として La, Nd, Tb, Y, Lu, Ga, Sc の 7 元素について検討を行い (図 1)、Gd よりもイオン半径の小さい Y, Lu 側、Al よりもイオン半径の大きい Ga, Sc 側ではガーネット相の発現により不良と確認できた。La 添加側で規則相維持もマトリックス相が Al₂O₃ から (GdLa) Al₁₁O₁₈ となっていることを同定し、添加前の状況が最良との状況を確定させた。さらに、 μ -PD 法では、5mm² において温度勾配向上策が、均一性向上に効果的であることを確認した。また、各種元素の置換量での共晶体を作製し、結晶構造の変化と共晶体における配向性の違いの一例として La 置換について述べる。La 添加系 (RE=La; x=0.5) の EBSD 結果を図 2 に示す。La 無添加の場合は、結晶成長方向に対して [0001]Al₂O₃//[010]GAP の配向関係を有しており、ファイバー相と成長方向の向きが一致している。一方、La を添加した試料では、ファイバーの向きが結晶成長方向に対して 40 度以上傾いており、両相は [0001]Al₂O₃//[111] (Gd_{0.42}Tb_{0.08}La_{0.5}) Al₁₀ の配向関係を有していた。このように、La 添加の場合は、結晶成長方向とファイバーの向きが傾くように変化する為、隣接するグレイン境界で規則相が分断されてしまい、多数の規則相の

グレインを有する構造になったと考えられる。この結果は、元素添加により、結晶成長方向に対する両相の配向関係が大きく変化することを示している。

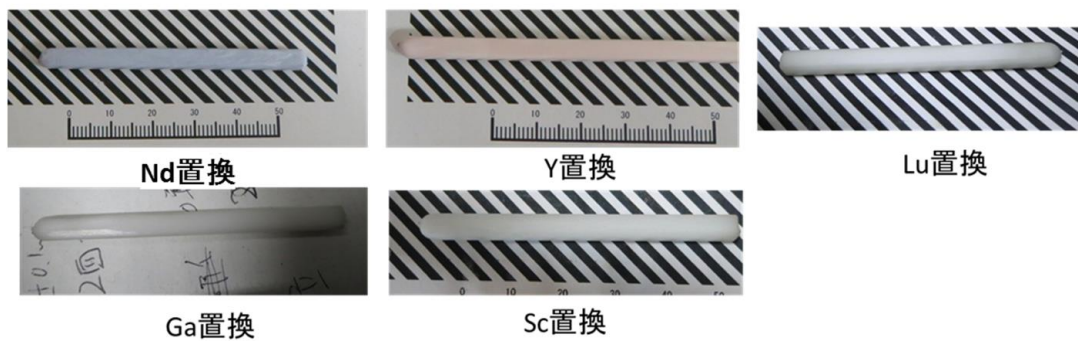


図 1. μ -PD 法で作製元素置換 GAP- Al_2O_3 共晶体の写真(各試料共に、5mm 角ダイの Ir 坩堝から成長)。

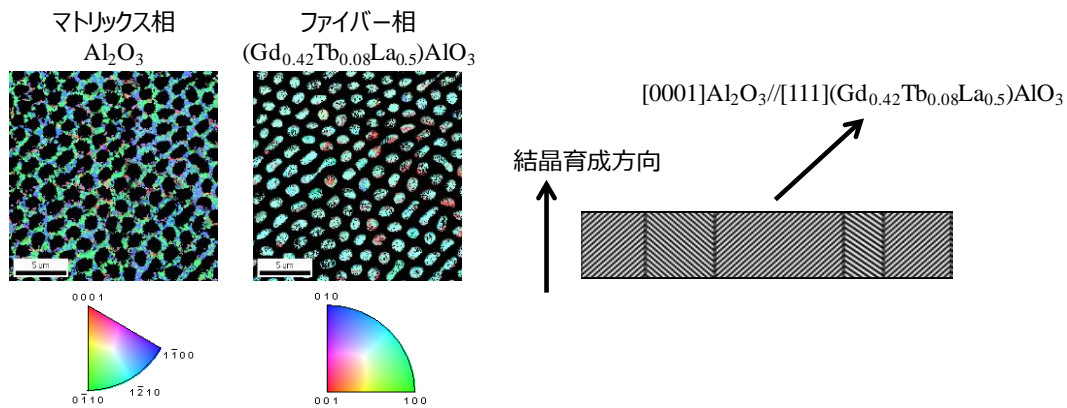


図 2 La 添加系 $(\text{Gd}_{0.5}\text{Tb}_{0.08}\text{La}_{0.5})\text{AlO}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$ の EBSD 結果。

(2) μ -PD 法および EFG 法における大口径化に向けた坩堝ダイ形状の検討

5mm \square 坩堝における検討結果を踏まえて、7.5mm \square 、10mm \square 、20mm ϕ のダイを有する坩堝の 3 条件について検討した。従来 μ -PD 法は、その名前にある通り、大口径の引き下げが実施されたことがなく、10mm \square 以上のダイは過去最大級のサイズとなる。検討の結果、メルト供給効はダイの口径が拡大した場合でも 1 か所穴かつオフセット位置が最適であることが分かった。さらに、EFG 法による 5mm 角程度の結晶の作製を進めたが、メルト供給孔付近の固液界面の平坦性が低下し、不規則領域が発生することから、大型化の検討は μ -PD 法を中心に進めるべきとの判断を下した。そして、メルト供給穴の周囲に不規則領域が広がりやすく、平坦なダイ領域において、固液界面が平坦化し、規則構造が得られるという知見を得た。この結果から、新たに 25mm 角の面積を有し、中心部からメルト供給穴の位置を外周部にずらした、1 個の穴を有するダイを設計し、結晶の作製を進めた(図 3)。ダイと融液の濡れ性、固液界面形状、ダイの穴数と重力の影響によるメルトの挙動を考慮し、ダイの設計、断熱材配置条件、雰囲気ガスの種類、種結晶のサイズと潜熱の移動による固液界面付近の温度条件の検討といった一連の結晶条件探索の結果、20mm 角の面積を有し、60% 程度の領域で光学的に透明な規則領域を有する共晶体を得ることが出来た。更に検討を進め、ガス雰囲気をも N₂ から He にするのみならず、ベースプレートの開口部を ϕ 19mm から ϕ 31mm すること、温度分布の対称性からアフターヒーターの開口部対角 2 か所から、4 か所にするここと、10mm \square の試料の全面で、不規則相の発生を抑制できることが確認できた。

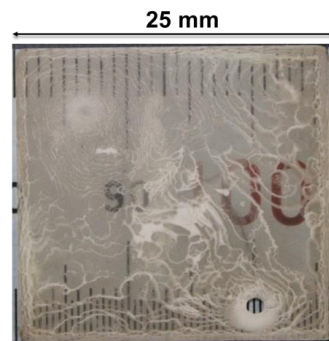


図 3. 25mm 角ルツボで育成した共晶体の切断ウエハ。

(3) 超高解像度イメージングの実証試験

始めに、結晶育成速度で成長した共晶体の内部を観察し、一方向凝固される共晶体の成長速度と構造周期（ないしファイバー直径）の相関関係が高い精度で成立していること確認した。ファイバー直径が $0.52\ \mu\text{m}$ 以下の微細な（成長速度で、 $1.5\sim 3.0\text{mm/min}$ ）場合には、GAP ファイバーからの光の出射が不明瞭になることから、可視光に対する回折限界領域に達していることも観察され、目的を遂行するに足る広い構造周期範囲を実現した。さらに 1221p/mm の X 線撮像を各構造周期を有する試料に対して行った。取得した各画像のラインプロファイルから CTF 値を算出し、CTF 値で 0.2 以上である構造周期がおおよそ $0.9\sim 2.0\ \mu\text{m}$ の範囲のものを用いることが適していることが確認できた。これは、成長速度で、 $0.2\sim 1.0\text{mm/min}$ の範囲に対応している。更に狭ピッチ CMOS センサとこれを組み合わせることにより、 $10\ \mu\text{m}$ 以下の周期パターンが検出可能な超高解像度を高感度で達成する X 線位相イメージング用検出器の試作と実証試験を行った。位相格子の自己像のレンズ光学系での撮像を行い、本実証に位相格子が作る $8.24\ \mu\text{m}$ 周期のパターンを用いることとした。さらに、研磨プロセスとセンサへの張り合わせ改善により、 $830\ \mu\text{m}$ 厚のシンチレータでも周期パターンが撮像できることを実証した（図 4）。結果として、ミクロンオーダーの超高解像度放射線検出器が実現した。この検出器を用いてアルファ線、ベータ線、ガンマ線の飛程を観察した研究成果が、Nature Publish Group の英国科学誌『Scientific Reports』に掲載された。

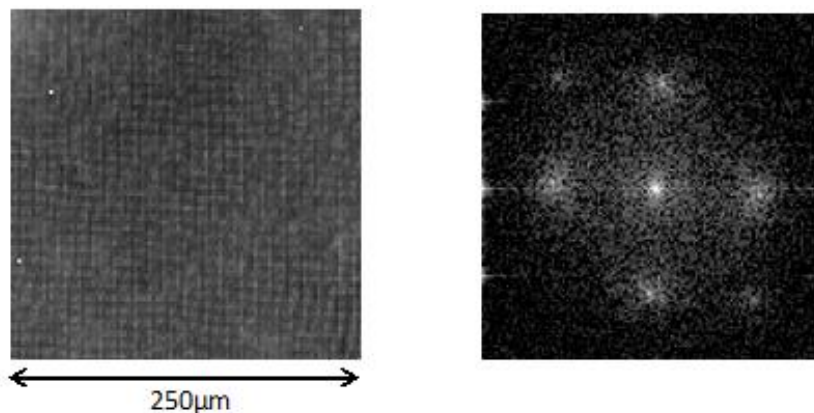


図 4. $830\ \mu\text{m}$ 厚試料貼付 CMOS センサでの G1 位相格子の自己像の撮像結果（左）、フーリエ変換像（右）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 7 件）

- ① Yuui Yokota, Shigeru Horii, Hiraku Ogino, Masao Yoshino, Akihiro Yamaji, Yuji Ohashi, Shunsuke Kurosawa, Kei Kamada, Akira Yoshikawa, Thermoelectric properties of Nb-doped SrTiO₃/TiO₂ eutectic solids fabricated by unidirectional solidification, Journal of Electronic Materials, 査読有, Vol.48(4), 2018, pp. 1-6, DOI: 10.1007/s11664-018-06880-2
- ② Kei Kamada, Nobuhiro Yasui, Yoshihiro Ohashi, Toru Den, Hiroaki Yamaguchi, Akihiro Yamaji, Yasuhiro Shoji, Masao Yoshino, Kyoung JinKim, Shunsuke Kurosawa, Yuji Ohashi, Yuui Yokota, Akira Yoshikawa, Optimization of Dopants and Scintillation Fibers' Diameter of GdAlO₃/ α -Al₂O₃ Eutectic for High-Resolution X-Ray Imaging, IEEE Trans. Nucl. Sci., 査読有, Vol.65, 2018, pp. 2036-2040, DOI: 10.1109/TNS.2018.2841026
- ③ Seiichi Yamamoto, Kei Kamada, Akira Yoshikawa, Ultrahigh resolution radiation imaging system using an optical fiber structure scintillator plate, Scientific Reports, 査読有, Vol.3194, 2018, pp.1-10, DOI: 10.1038/s41598-018-21500-z
- ④ Akira Yoshikawa, Kei Kamada, Shunsuke Kurosawa, Yuui Yokota, Akihiro Yamaji, Valery I. Chani, Yuji Ohashi, Masao Yoshino, Growth and characterization of directionally solidified eutectic systems for scintillator applications, J. Cryst. Growth, 査読有, Vol.498, 2018, pp.170-178, DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.02.032
- ⑤ Shunsuke Kurosawa, Akihiro Yamaji, Jan Pejchal, Yuui Yokota, Yuji Ohashi, Kei Kamada, Akira Yoshikawa, Growth of LiF/LiBaF₃ eutectic scintillator crystals and their

optical properties, J. Mater. Sci., 査読有, Vol.52, 2017, pp.5531-5536,
DOI: 10.1007/s10853-017-0815-1

- ⑥ Kei Kamada, Hiroyuki Chiba, Masao Yoshino, Akihiro Yamaji, Yasuhiro Shoji, Shunsuke Kurosawa, Yuui Yokota, Yuji Ohashi, Akira Yoshikawa, Growth and scintillation properties of Eu doped LiSrI₃/LiI eutectics, Opt. Mat., 査読有, Vol.68, 2017, pp. 70-74,
DOI: 10.1016/j.optmat.2017.05.010
- ⑦ Kei Kamada, Kosuke Hishinuma, Shunsuke Kurosawa, Akihiro Yamaji, Yasuhiro Shoji, Yuji Ohashi, Yuui Yokota, Akira Yoshikawa, Growth and scintillation properties of Tb doped LiGdF₄/LiF eutectic scintillator, Opt. Mat., 査読有, Vol.61, 2016, pp. 134-138,
DOI: 10.1016/j.optmat.2016.09.019

[学会発表] (計 5 件)

- ① 折口 和也、横田 有為、吉野 将生、山路 晃広、大橋 雄二、黒澤 俊介、鎌田 圭、吉川 彰、BaI₂-LuI₃ 混合物の熔融凝固時の相形成と熱的挙動、第47回結晶成長国内会議(JCCG-47)、2018年11月1日、仙台(ポスター発表)
- ② 折口 和也、横田 有為、吉野 将生、山路 晃広、大橋 雄二、黒澤 俊介、鎌田 圭、吉川 彰、新規ハロゲン化物シンチレータ開発を目的としたBaI₂-LuI₃状態図の作成と結晶育成、第79回応用物理学会 秋季学術講演会、2018年9月21日、名古屋(口頭発表)
- ③ Kei Kamada, Hiroaki Yamaguchi, Akihiro Yamaji, Masao Yoshino, Shunsuke Kurosawa, Yasuhiro Shoji, Yuui Yokota, Yuji Ohashi, Akira Yoshikawa, Development of growth technique for Tb doped GdAlO₃/α-Al₂O₃ eutectic scintillator, Sixth European Conference on Crystal Growth (ECCG6), 2018年9月18日, Varna(Bulgaria)(ポスター発表)
- ④ Akira Yoshikawa, Kei Kamada, Shunsuke Kurosawa, Yuui Yokota, Akihiro Yamaji, Valery I. Chani, Yuji Ohashi, Growth, optical and scintillation properties of directionally solidified eutectic systems, Phosphor Safari and the 6th International Workshop on Advanced Spectroscopy and Optical Materials (PS-IWASOM), 2017年7月12日, Gdansk(Poland)(招待講演、口頭発表)
- ⑤ Akira Yoshikawa, Kei Kamada, Shunsuke Kurosawa, Yuui Yokota, Akihiro Yamaji, Valery I Chani, Yuuji Ohashi, Growth and characterization of directionally solidified eutectic systems for scintillator application, 5th International Workshop on Directionally Solidified Eutectic Ceramics, 2016年4月4日, Warsaw(Poland)(招待講演、口頭発表)

[その他]

ホームページ等

<http://yoshikawa-lab.imr.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：黒澤 俊介

ローマ字氏名：Kurosawa Shunsuke

所属研究機関名：東北大学

部局名：未来科学技術共同研究センター

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：80613637