圧電セラミックスの 90°ドメインスイッチング特性に及ぼす熱応力の影響

馬場 康平^{*1}, 岡安 光博^{*2}

Effect of thermal energy on 90° domain switching characteristics of piezoelectric ceramic

Kohei BAMBA^{*1} and Mitsuhiro OKAYASU^{*2}^{*1,*2} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University
3-1-1 Tsushimanaka, Kitaku, Okayama 700-8530, Japan

Received: 14 December 2017; Revised: 14 March 2018; Accepted: 13 June 2018

Abstract

Domain switching characteristics of a commercial lead zirconate titanate piezoelectric (PZT) ceramic at high temperature of 100°C were investigated using an electron backscatter diffraction (EBSD) system. The PZT ceramic consisted of a tetragonal structure with grain size of about 5μm. To analyze the domain switching characteristics, the EBSD analysis was carried out in the same region of the PZT ceramic before and after the heating process. From this analysis, it appeared that each grain is formed by three different domains with different ratio. The area ratio of the domain was altered after the heating process because of the 90° domain switching. To understand clearly the 90° domain switching characteristics, the domain modes were categorized with the angle between the poling direction and c-axis of the tetragonal structure. Although the domain mode was categorized, no clear switching pattern was clarified, i.e., domain switching occurred randomly. Such domain switching mode was attributed to the complicated thermal stress in the PZT ceramic. In order to clarify the domain switching pattern under the heating process, the switching characteristics were investigated in details, in which the grain, having different stress distribution, was selected. The grain selected was constrained in the wide area by the other grains and some region was non-constrained due to the vacancy. From this analysis, severity of domain switching depended on the stress level, e.g., the higher compressive stress, caused by the thermal expansion of the other grains, made the strong domain switching.

Keywords : EBSD analysis, Domain switching, Thermal stress, PZT ceramic

1. 緒 言

圧電セラミックスは、電気・機械変換特性（圧電特性）を有する機能性材料である。この特性を利用し、アクチュエータやセンサなど多種多様なデバイスに搭載されている（Zhang et al., 2010）,（Zhang and Yu, 2011）,（Jiang et al., 2014）,（小川他, 2014）。

この圧電セラミックスにはさまざまな種類があり、中でもチタン酸ジルコン酸鉛（PZT 圧電セラミックス）は最も数多く使用されている。一般的に、PZT 圧電セラミックスは正方晶構造を有し、この結晶構造の *c* 軸（ドメイン）を高電圧による分極処理で同じ方向に配向させ、歪ませることにより圧電特性をもたせる。

一方、ドメイン（*c* 軸方向）の配向は、圧電セラミックスが強い外力（電氣的・機械的・熱的）を受けることで変化する（Li et al., 2002）,（Okayasu et al., 2011b）,（Cook et al., 1963）。これは、材料が外力を受けることでドメインが反転（DS：ドメインスイッチング）するためである。特に、正方晶構造を有する PZT 圧電セラミックスの場合、ドメインが 90°反転（90°DS）することが報告されている。この 90°DS は、ドメインの配向度を低下させる（Okayasu et al., 2011a）。このため、圧電セラミックスの信頼性向上を目的とした 90°DS 特性の調査が必要となる。

No.17-00570 [DOI:10.1299/transjsme.17-00570], J-STAGE Advance Publication date : 21 June, 2018

^{*1} 学生員, 岡山大学大学院 自然科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)^{*2} 正員, 岡山大学大学院 自然科学研究科

E-mail of corresponding author: pv0m1gz8@s.okayama-u.ac.jp

これまでの90°ドメインスイッチングに関する調査は、XRD (X-ray diffraction) やEBSD (Electron back scatter diffraction) 法により実施されている (Li et al., 2002), (来海他, 2008). XRD 法による調査では、PZT 圧電セラミックスの広範囲における (200) 面と (002) 面の強度比から、90°DS の有無および90°DS 強さを明確にしている (Li et al., 2002). EBSD 法では、結晶方位測定から90°DSを確認できる有効的な手法である (来海他, 2008). 著者らも EBSD 法を用いて90°DS 特性に及ぼす単軸圧縮の影響を調査しており、90°DS は圧縮負荷方向に対し、ドメイン (c 軸) 方向に近いほど強く起こることを明確にしている (Okayasu and Bamba, 2017).

PZT 圧電セラミックスのキュリー温度は、約 295°Cであるため、比較的高い温度環境下での使用が可能である。近年、圧電セラミックスを用いたデバイスの使用用途は拡大している。特に、ディーゼルエンジンの燃料噴射機構や、ノックセンサなどに搭載され、高温な環境下 (100°C程度) での使用要求が高まっている。実際、圧電セラミックスを用いたデバイスの使用環境は、常温だけに留まらないため、100°C程度の大気中における90°ドメインスイッチングに関する調査が必要になると考える。先に述べたように単軸圧縮条件下におけるドメインスイッチングの特性は調査されてきているが、高温環境下におけるスイッチング特性に関する報告はほとんど確認できない。著者らによる文献調査で、数十年前に熱エネルギーが及ぼす90°ドメインスイッチングの影響についての論文を確認した。そこでは PZT 圧電セラミックスを 300°Cまで加熱させ、結晶方位から90°DS 特性について検討している (Cook et al., 1963). しかし、ここでは基礎的な研究であり、熱エネルギーによる DS の挙動やメカニズムなどについては具体的に考察されていない。今後、圧電セラミックスを高温環境下において幅広く使用するにあたり、基本的な DS メカニズムを明確にする必要があると考える。そこで本研究では、高温環境下における PZT 圧電セラミックスのドメインスイッチング特性について、EBSD 測定により詳しく調査した。

2. 実験条件

2・1 供試材

供試材は、市販のソフト PZT 圧電セラミックス (富士セラミックス製 C-6 材) を用いた。この圧電セラミックスは平均粒径 2~5 μm のセラミックスをバインダーと押し固め高温で焼結させた。このサンプルサイズは 3×3×3 mm の立方体とした (図 1 参照)。両端面に銀溶着により電極を取り付け、電極方向に 2 kV/mm で分極処理を行った。分極処理後の結晶構造は正方晶ペロプスカイト型構造であり、格子定数は $c/a = 1.013$ ($a = b = 0.4046$ nm, $c = 0.4103$ nm) であった。

2・2 実験方法

90°ドメインスイッチングに及ぼす熱エネルギーの影響を調査するため、サンプルを 100°C (30 分間) で加熱した。DS 特性は EBSD (後方散乱電子回折) による結晶方位分析で評価した。分析条件は、加速電圧 15 kV, 照射電流 8 nA, 測定間隔 70 nm とした。分析面は OP-U 懸濁液等を用いて鏡面に仕上げた。図 1 に実験手順を示す。EBSD 分析はサンプルの中央部で加熱前後に実施した。なお、DS の特性を明確に評価するため、EBSD 分析はサンプルの同じ領域で実施した。

Fig.1 Schematic illustration of the tested specimen and testing condition.

3. 実験結果および考察

図2に加熱前後のEBSD分析結果(IPFマップ)を示す. 測定領域には約60個の結晶が確認できる. この分析の上部に見られる黒い領域は, サンプル焼結時に生成した空孔欠陥と考えられる. この空孔は, バインダーの不十分な充填とセラミック粒の低密度が関係している. 図から明らかなように, IPFマップ内には各結晶はさまざまな結晶方位を示している. しかし加熱後, この結晶方位は異なる向きに変化している. 詳細は後ほど示すが, この結晶方位の変化は90°ドメインスイッチングに関係している. また, ここでの観察から, すべての結晶内には, 3つの異なる結晶方位のドメインで構成されていることが確認できた(例えば, 赤色(001), 青色(110), 緑色(100)).

図3に代表的な2つの結晶の分析結果を示す. 図の(a)-(d)には, 加熱前後のIPFマップ, ドメインの方位を示す極点図, 加熱前後のドメインの面積率, そしてドメイン(*c*軸方向)と分極方向のなす角度をそれぞれ示している. 図3のGrain Iは, オレンジ色, 緑色, 黄緑色のドメインで構成されている. 各色のドメインは図3(b)に示すように異なる向きを示しているが, 幾何学的に解析した結果, 隣り合うドメインの角度は約90°であることが判明した.

90°DSについて詳しく調査するため, 各ドメインの面積率を加熱前後で調査した. ここではドメインスイッチングの強度をドメインの方位の変化率(面積率)で評価した. 得られた結果を図3(c)に示す. ここでは, 90°DS特性を明確にするため, ドメイン(*c*軸方向)と分極方向とのなす角度 θ を算出した. 角度 θ は正方晶における2つの結晶方位($h_1 k_1 l_1$)と($h_2 k_2 l_2$)の方位差 ϕ および, 結晶構造の c/a から次式で算出した.

$$\phi = \cos^{-1} \left\{ \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2 \left(\frac{c}{a}\right)^2}{\sqrt{\{h_1^2 + k_1^2 + \left(\frac{c}{a}\right)^2 l_1^2\} \{h_2^2 + k_2^2 + \left(\frac{c}{a}\right)^2 l_2^2\}}} \right\} \quad (1)$$

Fig. 2 EBSD analysis of PZT ceramic before and after heating to 100°C.

Fig. 3 EBSD analysis of representative grain (B₁B₂C) for PZT ceramic before and after heating process, showing the typical 90° domain switching characteristics: (a) IPF map; (b) crystal orientation map; (c) variation of domain ratio as a function of heating process; (d) determination of domain angle.

ここで、分極方向の方位(100), 得られたドメインの方位(h k l), $c/a=1.013$ とし、分極方向のドメインとのなす角度 θ は次式により算出できる。

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{h}{\sqrt{\{h^2 + k^2 + (1.013)^2 l^2\}}} \right\} \quad (2)$$

この角度は、EBSD 分析で得られた(001)[100]と分極方向を幾何学的に算出している。ここで得られた角度(θ)を、次の範囲で分類し整理した (図 3(d)参照) (A : $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$, B : $31^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, C : $61^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)。以後、この角度 θ をアルファベット(A, B, C)で表記する。例えば、結晶内に3つのドメイン θ が、 15° , 45° , 75° のときは、“ABC”と示す。ただし、結晶内に同じ分類範囲のドメイン θ が複数存在する場合 (例 45° , 50° , 55°)、 θ の小さい

Fig. 3 cont.

ドメイン (分極方向に近いドメイン) 順に添え字を付与する (例 B₁B₂B₃)。この調査を多数の結晶 (100 個以上) について行った結果, ほとんどの結晶は AC₁C₂, B₁B₂C, BC₁C₂ の 3 種類に分類できた (99%)。ただし, AC₁C₂ および B₁B₂C の結晶パターンは全体の約 83% を占め, BC₁C₂ は約 17% であった。図 3 には B₁B₂C で構成される 2 つの結晶を示している。加熱処理による DS 特性を調査した。Grain I の場合 (図 3(c)), ドメインの面積率は, 加熱処理によりドメイン B₂ が最も大きく減少し, ドメイン C が増加した。一方, Grain II (B₁B₂C) の分析結果から, Grain I とは異なる 90°DS 特性を示した。図より Grain II では, ドメイン C の面積率が減少し, B₁ が増加している。しかし, IPF マップ (☆印) より, このドメイン B₁ においても, 加熱後, 90°DS している。すなわち, 熱環境下において, 様々な形状を持つ結晶で構成されたセラミックス内には, 熱膨張により, 複雑な圧縮応力が生じる。このため 90°DS は, ある特定のドメインだけでなく, 様々なドメインで同時に起こる可能性があると予想できる。

これを検討するため, 代表的な結晶 (Grain I および Grain II) を詳細に調査した。結果を表 1 に示す。ここでは, 結晶中の各ドメインの加熱負荷によるドメインスイッチングを評価した。例えば, Grain I のドメイン C はドメイン B₁ と B₂ に変化している。ちなみに結晶全体で見た場合, 変化量は C→B₁: 13%, C→B₂: 2% であった。このように各ドメインの DS 量について具体的に調査した。表から明らかなように, 各ドメインは同時にさまざまなドメインに変化していることが確認できた。結晶中には DS 未発生領域 (Non-DS area) と DS 発生領域 (DS area) が存在することも確認できた。Grain I は, DS area が結晶全体の約 46% を占めている。ちなみに, 各ドメインの

Table 1 Determination of domain switching for representative grain (B_1B_2C): (i) Grain I; (ii) Grain II.

(i) Grain I				
	Before heating	→	After heating	Domain ratio
DS area 46 %	C	→	B_1	13 %
		→	B_2	2 %
	B_2	→	B_1	22 %
		→	C	1 %
	B_1	→	B_2	6 %
		→	C	2 %
Non-DS area 54 %	C	→	C	47 %
	B_2	→	B_2	6 %
	B_1	→	B_1	1 %

(ii) Grain II				
	Before heating	→	After heating	Domain ratio
DS area 70 %	C	→	B_1	10 %
		→	B_2	26 %
	B_2	→	B_1	7 %
		→	C	5 %
	B_1	→	B_2	17 %
		→	C	5 %
Non-DS area 30 %	C	→	C	9 %
	B_2	→	B_2	1 %
	B_1	→	B_1	20 %

DS 量は結晶全体で見た場合、それぞれ B_1 :8%, B_2 :23%, C:15%である。このようにドメイン B_2 の DS 量が最も多いことが確認できた。一方、Grain II は、結晶中のさまざまなドメインで DS が起こっていたが、Grain I とは異なる傾向が見られた。表で示した通り、DS area は結晶全体の約 70%であり、ドメイン C の DS 量が最も多いことが確認できた。このように、各結晶で DS 特性は異なることが予想される。しかし、EBSD 法には分析精度の限界があり、加熱前後において結晶を同じ形状で捉えることはできなかった。そのため、ここで行った調査では良好な精度が得られていない可能性がある。各結晶の DS 特性を定量的に評価するためには、面積率変化を用いた調査が本研究では有効であると考ええる。

90°DS 特性について定量的に調査するために、ドメインの面積率変化を用いた評価を行った。ここでは結晶 100 個以上について評価を行った。まとめた結果を図 4 に示す。ドメインのパターン毎 (AC_1C_2 , B_1B_2C , BC_1C_2) に分類し、最も強く 90°DS したドメイン数を示している。どのパターンにおいても、DS 数は 3 つのドメインにおいて平均的な値を示している。ちなみにパターン AC_1C_2 の場合、DS したドメイン数は、それぞれ A:15 個、 C_1 :13 個、 C_2 :17 個であった。基本的に 90°DS は、外部負荷の強さや負荷方向により影響される。先行研究 (Okayasu and Bamba, 2017) では、単軸圧縮応力に及ぼす 90°DS の影響について調査しており、負荷方向に近いドメインほど、強く 90°DS することを明らかにしている。本研究では、外部負荷として熱応力を加えており単軸圧縮応力とは異なる。この応力状態の相違が、90°DS 特性を変化させたと考ええる。この場合、熱による複雑な内部応力が 90°DS

Fig. 4 Rate of switching domain strongly occurred in each grain: (a) AC_1C_2 ; (b) B_1B_2C ; (c) BC_1C_2 . The strong domain switching occurred at various domain mode after heating to 100°C.

(a) Definition of each area for Grain III (B_1B_2C)

(b) Domain switching characteristics in each area

Fig. 5 EBSD analysis of representative grain (B_1B_2C) under consideration of the effect of the constrain condition: (a) definition of each area; (b) domain switching characteristics in each area. The amount of domain switching was different in each area. Especially, little domain switching occurred at less constrained area (Area 2).

をランダム化させたと推測できる。基本的に本供試材は不均一粒子で構成されている。このような圧電セラミックスに欠陥が存在すると加熱した際、熱応力の分布は不規則になると考えられる。この場合、熱膨張により粒子同士が接触し、圧縮応力が生じると考えられるため、欠陥部周辺の粒子内の圧縮応力は低くなると予想できる。

この現象を確認するため、90°ドメインスイッチングに及ぼす熱応力の影響について詳しく調査した。ここでは、Grain III について検討する。図 5(a)に示す IPF map より、Grain III は周囲 3 つの結晶で拘束されている領域 (Area 1) と欠陥による拘束力の弱い領域 (Area 2) が確認できる。この観察領域において、先に示した加熱条件で熱応力を加え、90°DS 特性について調査した。得られた IPF マップを図 5(b)に示す。この結果、強く拘束されている Grain III の Area 1 では、縞状に見えるドメイン壁 (青色や緑色) が、加熱によりほぼ消滅していることが確認できる。ちなみに青色及び緑色のドメインと分極方向とのなす角度 θ は、先に説明した範囲 B に分類できる。一方、オレンジ色は範囲 C に相当する。またこのサンプルの分極方向を図 5 に示すが、この場合の周囲の結晶の拘束条件から、熱応力が素材に生じた場合、結晶間 (例えば①②③ $\leftrightarrow$ ⑤や①②③ $\leftrightarrow$ ④) に圧縮応力が強く発生し、ドメイン B₁ と B₂ が分極方向と異なる方向 (ドメイン C) にスイッチングしたと考える。図 5(b)に示すように、Area 1 では、ドメイン B₁ と B₂ の面積率が減少し、ドメイン C の面積率が増加している。Area 2 においても、結晶④と⑤に隣接するため、圧縮応力は発生すると考える。しかし、空孔が存在するため Area 1 より応力は低下すると予想できる。そのため、Area 2 の 3 つドメイン (C, B₁, B₂) は、Area 1 ほどドメインスイッチングが強く起こらなかったと考えられる。これらの結果から、熱応力下でのドメインスイッチングは、結晶の拘束条件に大きく影響することがわかった。ここでは結晶の熱膨張により生成した熱応力が主でドメインスイッチングが起こったと考える。しかし、単純に熱膨張の熱応力だけでなく、周囲の結晶の形状や結晶内にドメインの方向及びドメインの分布形態に依存することと予想できる。実際、Okayasu らは、XRD 法によって 100°C 程度における PZT 圧電セラミックスの格子定数を調査している。ここでの調査で、結晶格子は *a* 軸方向に伸びるが *c* 軸方向は縮むと報告されている (Okayasu et al., 2009)。このように結晶方位により圧電セラミックスの熱ひずみ量が変化すると予想できる。これらを考慮すると、熱ひずみ分布は複雑化することが予想できる。先行研究では、負荷方向に対してドメインの *c* 軸方向が平行に近いドメインほどドメインスイッチングを起こしやすいと報告されている (Okayasu and Bamba, 2017)。そのため、複雑化する熱応力の分布においても、応力方向に近いドメインほどスイッチングが強く起こると考えられる。しかし本研究では、詳細について議論していない。よって、より正確なドメインスイッチング特性を明確にするには、さらなる調査が必要である。

4. 結 言

EBS 法により、PZT 圧電セラミックスの 90°ドメインスイッチング特性に及ぼす熱応力の影響について調査した。この結果、比較的低い 100°C 程度の加熱温度でもドメインスイッチングが起こることを確認した。熱エネルギーによる 90°ドメインスイッチングは、結晶を構成するどのドメインにおいても起こる可能性があることがわかった。これは、90°ドメインスイッチングが、隣接する結晶の熱膨張により生じる不規則な熱応力が原因であった。実際、結晶の拘束条件によって 90°ドメインスイッチングの強度が異なり、応力の強さやドメインの向きによって影響していた。

文 献

- Cook, W. R., Berlincourt, D. A. and Scholz, F. J., Thermal expansion and pyroelectricity in lead titanate zirconate and barium titanate, *Journal of Applied Physics*, Vol.34, No.5 (1963), pp.1392-1398.
- Jiang, X., Kim, K., Zhang, S., Johnson, J. and Salazar, G., High-Temperature piezoelectric sensing, *Sensors*, Vol.14 (2014), pp.144-169, DOI: 10.3390/s140100144.
- 来海 博央, 恒川 卓也, 白木原 香織, 田中 啓介, 圧電セラミックスの結晶方位ならびに分域・分域反転の EBS 観察, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.74, No.739 (2008), pp.335-341.
- Li, X., Shih, W. Y., Vartuli, J. S., Milius, D. L., Aksay, I. A. and Shih, W. H., Effect of a transverse tensile stress on the electric-field-induced domain reorientation in soft PZT: In situ XRD study, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.85, No.4 (2002), pp.844-850.
- 小川 真史, 高木 賢太郎, 軸屋 一郎, 井上 剛志, セルフチューニング負性キャパシタによる適応圧電シャントダンピング, *日本機械学会論文集*, Vol.80, No.820 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0382.
- Okayasu, M. and Bamba, K., Domain switching characteristics of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics on a nanoscopic scale, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.37, No.1 (2017), pp.145-159.

- Okayasu, M., Otake, M., Bitoh, T. and Mizuno, M., Temperature dependence of the fatigue and mechanical properties of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics, *International Journal of Fatigue*, Vol.31 (2009), pp.1254-1261.
- Okayasu, M., Sato, K. and Mizuno, M., Influence of domain orientation on the mechanical properties of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.31 (2011a), pp.141-150, DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.09.003.
- Okayasu, M., Sato, K. and Kusaba, Y., Domain switching characteristics of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics during mechanical compressive loading, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.31 (2011b), pp.129-140.
- Zhang, S., Jiang, X., Lapsley, M., Moses, P. and Shrout, T. R., Piezoelectric accelerometers for ultrahigh temperature application, *Applied Physics Letters*, Vol.96 (2010), DOI: 10.1063/1.3290251.
- Zhang, S. and Yu, F., Piezoelectric materials for high temperature sensors, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.94, No.10 (2011), pp.3153-3170.

References

- Cook, W. R., Berlincourt, D. A. and Scholz, F. J., Thermal expansion and pyroelectricity in lead titanate zirconate and barium titanate, *Journal of Applied Physics*, Vol.34, No.5 (1963), pp.1392-1398.
- Jiang, X., Kim, K., Zhang, S., Johnson, J. and Salazar, G., High-Temperature piezoelectric sensing, *Sensors*, Vol.14 (2014), pp.144-169, DOI: 10.3390/s140100144.
- Kimachi, H., Tsunekawa, T., Shirakihara, K. and Tanaka, K., Observation of crystal orientation, domain and domain switching in ferroelectric ceramics by EBSD method, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.74, No.739 (2008), pp.335-341 (in Japanese).
- Li, X., Shih, W. Y., Vartuli, J. S., Milius, D. L., Aksay, I. A. and Shih, W. H., Effect of a transverse tensile stress on the electric-field-induced domain reorientation in soft PZT: In situ XRD study, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.85, No.4 (2002), pp.844-850.
- Ogawa, T., Takagi, K., Jikuya, I. and Inoue, T., Adaptive piezoelectric shunt damping by self-tuning negative capacitor, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol.80, No.820 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0382.
- Okayasu, M. and Bamba, K., Domain switching characteristics of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics on a nanoscopic scale, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.37, No.1 (2017), pp.145-159.
- Okayasu, M., Otake, M., Bitoh, T. and Mizuno, M., Temperature dependence of the fatigue and mechanical properties of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics, *International Journal of Fatigue*, Vol.31 (2009), pp.1254-1261.
- Okayasu, M., Sato, K. and Mizuno, M., Influence of domain orientation on the mechanical properties of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.31 (2011a), pp.141-150, DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.09.003.
- Okayasu, M., Sato, K. and Kusaba, Y., Domain switching characteristics of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics during mechanical compressive loading, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.31 (2011b), pp.129-140.
- Zhang, S., Jiang, X., Lapsley, M., Moses, P. and Shrout, T. R., Piezoelectric accelerometers for ultrahigh temperature application, *Applied Physics Letters*, Vol.96 (2010), DOI: 10.1063/1.3290251.
- Zhang, S. and Yu, F., Piezoelectric materials for high temperature sensors, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.94, No.10 (2011), pp.3153-3170.