強誘電体単結晶 PMN-PT の超精密平面研削と誘電特性

高橋 秀彰** 難波 義治*** 鈴木 浩文*** 高橋 誠†

Effects of Ultra-Precision Surface Grinding on Dielectric Properties of PMN-PT Single Crystals

Hideaki TAKAHASHI, Yoshiharu NAMBA, Hirofumi SUZUKI and Makoto TAKAHASHI

Lead magnesium niobate-lead titanate (PMN-PT) single crystals having higher dielectric properties were ground with various diamond wheels and an ultra-precision surface grinder. The grinding force measured with a dynamometer depends upon the grinding time, depth of cut, feed per wheel revolution and grain size of diamond wheels. The dielectric constant of ground sample is a function of thickness of sample, grinding force and grain size, but not a function of depth of cut and grinding direction. The dielectric constant of ground sample is higher than that of polished one, and can be recovered by the heat treatment. The domain of ground surface re-orientates to the grinding direction.

Key words: lead magnesium niobate-lead titanate single crystal, ultra-precision grinding, dielectric properties, grinding force, dielectric constant, piezo-response microscopy, ultrasonic transducer

1. 緒 言

強誘電体は誘電性、焦電性、圧電性などの物性を有し、外部電場や応力により自発分極が反転する特性がある。これらの性質から、強誘電体はコンデンサや加速度センサ、微小位置決めアクチュエータ、強誘電体メモリなど各種電子機器に使用されている。強誘電体材料の中でもマグネシウムニオブ酸・チタン酸鉛(PMN-PT)単結晶¹⁾⁴⁾はジルコンチタン酸鉛(PZT)セラミックスに比べ、誘電・圧電特性および電気機械結合係数が高いという長所があり、振動子に用いることで超音波プローブの高感度化が期待されている。この時、振動子を薄板化・微小化することにより高分解能化が期待できる⁵⁾⁸⁾。この薄板化には、一般に研磨法が採用されている。この場合、研磨による誘電特性の劣化⁹⁾¹⁰⁾があり、面だれが生じやすく、試料1個の加工に適さないという問題がある。

前報¹¹⁾¹²⁾において PMN-PT 単結晶を立軸回転テーブル型超精密平面研削盤とカップ型レジノイドボンド・ダイヤモンド砥石を使用して超精密平面研削すると、加工条件により脆性研削面、延性・脆性混在研削面、延性研削面が得られ、延性研削面では表面下にマイクロクラックがないことが明らかとなった。PMN-PT 単結晶は機能材料であり、幾何学的表面特性に加えて機能を損なわないことが重要である⁷⁾⁸⁾。

そこで本報では、研削による材料の薄板化を目指し、機能材料としての PMN-PT 単結晶の誘電特性と超精密平面研削との関係を明らかにするものである。

2. 実験装置および方法

ペロブスカイト構造をした組成相境界近傍の PMN-PT 単結晶を6面が{001}となるように寸法4mm×4mm×0.7mmに切断し、試料とした。この材料は融液ブリッジマン法により育成した結晶⁴⁾¹³⁾で、室温では菱面体晶である¹⁰⁾。脱分極した試料の4mm

Fig. 1 Crystal structure of PMN-PT and grinding direction

角の両面を加工した。図1はPMN-PT単結晶の結晶構造と研削方向を示している。

表面加工には立軸回転テーブル型超精密平面研削盤¹⁴⁾および延性研削面および延性・脆性混在研削面が得られる¹²⁾表1の6種類のカップ型レジノイドボンド・ダイヤモンド砥石を使用した。カップ型砥石の外径は125mm、砥粒層の幅は3mmである。試料は試料ホルダを介して回転テーブルに固定し、砥石は6本のボルトで砥石軸に取付けた。研削は、テーブルを回転させることで試料に送りを与え、砥石軸を降下させることで切込みを与えた。加工中は加工点付近に水道水を供給し、定切込みのワンパス研削で試料を仕上げた。接線研削抵抗 F_t と法線研削抵抗 F_n の測定には図2のようにKistler社の切削動力計9257Bを用いた。また、研削抵抗を測定する際には、16mm角の試料を使用した。この場合の砥石と工作物との最大接触面積は48mm²である。

超精密研削面と比較するための研磨には豊田バンモップス(株)製平面研磨盤¹⁰⁾を使用した。

Table 1 Grain size of used diamond wheels

Wheel	Grain size	Mean grain size
SD5000-J-75-B	0.5-3 μm	1.75 μm
SD3000-J-75-B	2-6 μm	4 μm
SD2400-J-75-B	4-8 μm	6 μm
SD2000-J-75-B	5-12 μm	8.5 μm
SD1500-J-75-B	8-15 μm	11.5 μm
SD1000-J-75-B	12-25 μm	18.5 μm

* 原稿受付 平成29年2月21日

掲載決定 平成29年5月17日

** 学生会員 中部大学大学院(愛知県春日井市松本町1200)

*** 正会員 中部大学(愛知県春日井市松本町1200)

† 中部大学(愛知県春日井市松本町1200)

Fig. 2 Dynamometer on rotary table

表面の観察には Zygo 社の三次元表面構造解析顕微鏡 NewView200, 株式会社製作所製ナノサーチ顕微鏡 SFT-3500, エスアイアイ・ナノテクノロジー(株)製走査型プローブ顕微鏡 SPA 400 および圧電応答顕微鏡 Nanocute/NanoNavi II を使用した。

加工を施した試料の上下面にサンヨー電子(株)製 DC マグネトロンスパッタ装置 SC-704MC で厚み 100nm の金電極を成膜した。電極の形状は、試料上面は直径 3.6mm の円形、下面は 4mm 角とし、電極間の短絡を防止した。

その後、温度 25℃ の大気中で直流電界 800V/mm を 10min 間印加し分極処理を行った。この分極処理は、菱面体晶において [111] 方位と等価な 8 方向に存在する自発分極を巨視的に試料厚み方向の [001] 方位に整列させ比誘電率を高めるために必要な処理である。

誘電特性の評価には比誘電率を使い、平行板コンデンサ法により測定した。すなわち、図 3 のように(株)エヌエフ回路設計ブロック製 LCZ メータ(NF 2340)を使用して、試料の静電容量を測定周波数 1 kHz, 交流振幅 1 V, 直流バイアスなし、温度 25℃ の条件で測定し、比誘電率を次式から計算した。

$$\epsilon_{33}^T = \frac{Ct}{\epsilon_0 S} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_{33}^T は比誘電率、 C は静電容量[F]、 t は試料厚み[m]、 ϵ_0 は真空の誘電率(8.85×10^{-12})[F/m]、 S は電極面積[m²]である。

また、比誘電率の応力依存性を測定するため図 4 のような構成の装置を用いた。試料は、44μm 厚と 60μm 厚に研磨した試料を東京理化工機(株)製の真空定温乾燥器(VOS-300VD)内で、大気圧中 200℃ 1h 加熱して焼鈍したものを使用した。

Fig. 3 Measurement of dielectric properties of PMN-PT sample

Fig. 4 Measuring system for relationship between dielectric constant and applied load to annealed samples

3. 実験結果および考察

3.1 加工条件と研削抵抗との関係

延性研削が可能な SD3000-J-75-B 砥石を用いて、砥石周速 $v=20\text{m/s}$, 切込み $a=5\mu\text{m}$, 砥石 1 回転当たりの送り $f=10\mu\text{m/rev}$ の加工条件で、研削による加工変質層の特性を支配する研削抵抗を図 2 の動力計で測定した結果を図 5 から図 7 に示す。ドレッシング後、砥粒切れ刃の脱落と摩耗により、接線研削抵抗 F_t および法線研削抵抗 F_n は図 5 のように時間的に変化する。図 5 より、研削開始から 4mm³ までの研削抵抗が急激に変化する過渡期とそれ以降の安定期があることがわかる。本研究では以後、安定期の砥石で研削抵抗に及ぼす加工条件の影響を調べた。

切込みを $5\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ の範囲で変えて研削した結果が図 6 であり、この条件下では研削抵抗は切込みに比例する。しかし、カップ型砥石による超精密平面研削法の特徴として表面粗さは切込みに依存しない¹²⁾¹⁵⁾¹⁷⁾。

図 7 に各種砥粒径のダイヤモンド砥石で PMN-PT 試料を研削した際の法線研削抵抗 F_n および研削抵抗分力比 F_t/F_n と砥石 1 回転当たりの送りの関係を示す。図 7 より、研削抵抗は平均砥粒径および砥石 1 回転当たりの送りに依存して変化する。 F_n は平均砥粒径が大きく、砥石 1 回転当たりの送りが遅くなるほど

Fig. 5 Change of grinding forces with grinding time

Fig. 6 Relationship between grinding forces with depth of cut

Fig. 7 Relationship between grinding force and feed per wheel revolution

小さくなる。また、砥石の切れ味を示す F_t/F_n は平均砥粒径が大きく、砥石 1 回転当たりの送りが小さくなるほど大きくなる。砥粒が小さい SD5000-J-75-B 砥石では研削抵抗が大きいので、しばしば薄板試料が割れる現象が生じた。この実験の中で、マイクロクラックが一部で生じる SD1500-J-75-B 砥石を用いると研削抵抗は最少となり、切れ味が最も良いことがわかる。

3.2 研削面の表面形状と研削面表層部のドメイン構造

圧電応答顕微鏡を用いて、研削方向が異なる加工面を観察した結果が図 8 である。図 8 の(a)は形状(Topography)像であり、研削条痕を示す。探針と試料間に交流電圧を印加し、圧電効果による探針の変位から分極の状態を観察した結果を示すものが、図 8 の(b)の圧電応答顕微鏡(Piezo-Response Microscope: PRM)像である。研削方向は 1)が[010]、2)が[110]、3)が[1 $\bar{1}$ 0]であり、各研削方向の形状像と PRM 像は同時測定した結果である。これらの試料は、1つの試料を 3 等分し、研削方向がそれぞれ目的の方向になるようにテーブルに固定した後に SD3000-J-75-B 砥石を使用して $a=2\mu\text{m}$ 、 $f=5\mu\text{m}/\text{rev}$ 、 $v=20\text{m/s}$ の加工条件で同時研削した結果である。これらの観察結果より、超精密研削加工による加工面表層部のドメイン¹⁰⁾は研削方向に再配向することが確認できた。

3.3 圧縮応力と比誘電率の関係

研削抵抗が比誘電率に及ぼす影響を予備的に調べるため、精密研磨後に空气中で焼鈍¹⁰⁾を施した厚み $44\mu\text{m}$ と $60\mu\text{m}$ の 2 種類の試料を用意し、試料両面に金を成膜し、図 4 のように試料を加圧しながら比誘電率を測定した。その結果の一例が図 9 であり、試料厚みに関係なく、この圧縮応力範囲内では比誘電率は圧縮応力の増加と共に直線的に低下することが明らかとなった。これより、研削抵抗の増加と共に比誘電率が低下することが予想できる。なお、この関係はマクロには可逆的な関係に見えるがミクロには不可逆的であり、加圧により誘電損失が生じる。

(a) Topography (b) PRM image

1) Ground surface at grinding direction [010]

(a) Topography (b) PRM image

2) Ground surface at grinding direction [110]

(a) Topography (b) PRM image

3) Ground surface at grinding direction [1 $\bar{1}$ 0]

Fig. 8 Topography and PRM images of surfaces ground at various grinding directions

3.4 加工条件が比誘電率に及ぼす影響

3.4.1 研削方向と比誘電率

PMN-PT 単結晶{001}面は、硬度と超精密研削面の表面粗さが[010]方向と[110]方向で異なることが報告されている¹¹⁾。そこで、超精密研削において比誘電率が研削方向に依存するかどうか調べた結果が図 10 である。本実験では、1 枚の板から 4mm 角に切

Fig. 9 Relationship between dielectric constant and applied compressive stress

Fig. 10 Relationship between dielectric constant and grinding direction

り出した 6 枚の試料を、研削方向が[010]方向および[110]方向になるように各方向 3 枚ずつ同一の試料台に貼り付け、SD3000-J-75-B 砥石を使用し、 $v=20\text{m/s}$ 、 $a=5\mu\text{m}$ 、 $f=5\mu\text{m/rev}$ の加工条件で同時に研削した。その結果、研削方向が[010]の比誘電率の平均値は 5001、[110]方向の比誘電率の平均値は 4949 である。このように、本加工条件では研削方向による比誘電率の変化は確認されなかった。

3.4.2 試料厚みと比誘電率

研磨加工を施すと試料の比誘電率は、試料厚みの減少と共に低下することが知られている⁹⁾¹⁰⁾。そこで、試料厚みと比誘電率の関係を求めるため、SD3000-J-75-B 砥石を使用し、 $v=20\text{m/s}$ 、 $a=5\mu\text{m}$ 、 $f=5\mu\text{m/rev}$ の加工条件で試料厚みを 500 μm から 18 μm の間で任意の厚みに研削し、比誘電率を測定した。また、比較のために精密研磨を施した試料についても同様の測定を行った。なお、精密研磨は平均一次粒径が 7nm の SiO_2 を超純水に 3wt% 分散させた研磨液と発泡ポリウレタンパッドを使用し、平面研磨盤で片面ずつ両面を研磨した。精密研磨における縁ダレを抑制するため、評価試料の周囲 3mm に同一厚み、同一研磨除去率のダミー材を密着させて配置し、試料厚みが均一になるよう努めた。精密研磨を施した加工面のレーザ共焦点微分干渉顕微鏡観察および原子間力顕微鏡観察では、研磨による傷は見当たらず、自発分極の正負に対応した高低差が約 10nm のドメイン構造¹⁰⁾が加工面に形成された。図 11 に両加工を施した試料の試料厚みと比誘電率の関係を示す。図より、比誘電率は本来、試料厚みに依存しない値であるが、両加工法ともに、試料厚みが薄くなるに伴い比誘電率が劣化する傾向を示した。各試料厚みにおける比誘電率の劣化は精密研磨に比べ研削の方が小さく、試料厚みが 100 μm 以上ではほぼ一定値を示す。このことは厚みが薄くなるほど精密研磨よりも研削の方が振動子とケーブルとのインピーダンスの整合性がとりやすく、高感度なプローブを容易に製造できる可能性があることを示している。

Fig. 11 Relationship between dielectric constant and thickness of machined sample

Fig. 12 Drop of dielectric constant on various samples with decrease of thickness by grinding

3.4.3 異なる比誘電率の試料における比誘電率の劣化率

PMN-PT 単結晶{001}面は、結晶育成時のチタンの偏析およびドメイン構造などにより比誘電率が容易に変化し、その変化は比誘電率で約 5000 から約 7000 と幅広い。そこで、異なる比誘電率の試料を準備し、同一加工を施した際の比誘電率の変化を比較評価した。本実験では、比誘電率が異なる 3 種類の 4mm 角試料を使用し、それぞれ 3 枚ずつ計 6 枚を同一の試料台に貼り付け同時研削した。SD3000-J-75-B 砥石を使用し、 $v=20\text{m/s}$ 、 $a=5\mu\text{m}$ 、 $f=5\mu\text{m/rev}$ の加工条件で研削し、試料厚みを 300 μm と 50 μm に加工し、比誘電率を測定した。その結果を図 12 に示す。図より、試料厚み 300 μm の 3 種類の比誘電率は 5167、5578、6661 であったが、これらを厚み 50 μm に薄板化した場合の比誘電率は 4652、4971、5999 であった。厚み 300 μm の試料の比誘電率に対する厚み 50 μm の試料の比誘電率の比を劣化率と定義すると図 12 のように材料本来の比誘電率に関係なくほぼ 10%であった。

3.4.4 研削条件と比誘電率の関係

図 13 は、比誘電率に及ぼす砥石 1 回転当たりの送り f の影響を調べるため、平均砥粒径 4 μm の砥石を使用し、 $v=20\text{m/s}$ 、 $a=5\mu\text{m}$ の条件で $f=1\sim 100\mu\text{m/rev}$ と変化させて試料を 50 μm の厚みに加工した結果である。研削した試料の比誘電率は砥石 1 回転当たりの送りに依存し、砥石 1 回転当たりの送りが速くなるほど比誘電率が減少する傾向を示している。これは図 7(a)より砥石 1 回転当たりの送りを大きくすると法線研削抵抗が増加し、図 9 に示すように比誘電率が試料での垂直応力に依存することから説明できる。この試料を大気中 480 $^{\circ}\text{C}$ で 1 時間熱処理した結果を赤線で示す。図 13 より、この比誘電率の減少は熱処理を施すことで回復し、砥石 1 回転当たりの送り依存性は消滅する。この結果から、加工後に熱処理が可能な場合には砥石 1 回転当たりの送りを速くすることで高い加工効率と高い比誘電率の両立が可能となる。また、加工後に熱処理を施すことができない場合は砥石 1 回転当たりの送りを遅くすることで熱処理を施さなくても高い比誘電率を得ることが可能である。

図 14 は、比誘電率と切込みの関係性を調べるため、平均砥粒径 4 μm の砥石を使用し、 $v=20\text{m/s}$ 、 $f=5\mu\text{m/rev}$ の条件で a を 5 μm から 30 μm の間で変化させ試料を 50 μm の厚みに加工した結果である。また、加工した試料を大気中 480 $^{\circ}\text{C}$ で 1 時間熱処理した結果も合わせて示す。図より、本実験条件範囲内では、比誘電率は切込みおよび熱処理に依存せず、切込みを大きくしても比誘電率は低下しないことが確認された。したがって、高能率研削を目指す場合は切込みを大きくすればよいことが明らかとなった。

Fig. 13 Relationship between dielectric constant and feed per wheel revolution on ground sample

Fig. 14 Relationship between dielectric constant and depth of cut in ultra-precision surface grinding

3. 4. 5 砥粒径と比誘電率の関係

続いて、比誘電率と砥石の粒径の関係を調べるために、粒径の異なる 5 種類の砥石を使用し、 $v=20\text{m/s}$ 、 $a=5\mu\text{m}$ 、 $f=5\mu\text{m/rev}$ の研削条件で試料厚みを $50\mu\text{m}$ に仕上げ、比誘電率を測定した。その結果を図 15 に示す。図より、比誘電率は砥石の粒径に依存し変化する。平均砥粒径 $1.75\mu\text{m}$ (SD5000-J-75-B) から $11.5\mu\text{m}$ (SD1500-J-75-B) の間では、比誘電率は砥粒径が大きくなるに伴い高くなり、さらに粗粒の平均砥粒径 $18.5\mu\text{m}$ (SD1000-J-75-B) では、完全に延性・脆性混在研削面となる¹²⁾ため、比誘電率は急激に低下し約 3200 となった。図 16 に、薄板化に伴う比誘電率の劣化率と砥石の平均砥粒径の関係を示す。比誘電率の劣化率は値が小さいほど材料本来の値に近く、好ましいことを意味する。図より、平均砥粒径 $1.75\mu\text{m}$ (SD5000-J-75-B) の砥石を使った場合の比誘電率の劣化率は 14% であるが、平均砥粒径 $11.5\mu\text{m}$ (SD1500J7B) の砥石を使用することで劣化率を 5% まで低減させることができる。

Fig. 15 Relationship between dielectric constant and average grain size of diamond wheel

3. 4. 6 研削抵抗と比誘電率の関係

図 17 に比誘電率と研削抵抗の関係を示す。これは、図 7(法線研削抵抗と砥石 1 回転当たりの送り)と図 13(比誘電率と砥石 1

Fig. 16 Relationship between drop of dielectric constant and average grain size of diamond wheels

回転当たりの送り)と図 15(比誘電率と平均砥粒径)の結果を比誘電率と法線研削抵抗(法線研削抵抗/砥石と工作物との接触面積)についてまとめなおしたものである。この図より、比誘電率は法線研削抵抗に依存して変化する、高い比誘電率を得るには法線研削抵抗を低くする必要があることがわかる。この図 17 の傾向は、単純圧縮実験で求めた図 9 の比誘電率と圧縮応力との関係と極めて類似している。図 17 の SD3000-J-75-B や SD2400-J-75-B の砥石ではどの条件でも延性研削面が得られる。しかし、図中の SD1500-J-75-B 砥石を使用した場合は研削抵抗が低いいため比誘電率は高くなるが、研削面は図 18 のように延性研削面に微小な欠陥が存在する。この欠陥が振動子として使用している間にき裂源にならなければこの砥石を使うことが望ましい。これについては、振動子を作成し、寿命試験をする必要がある。なお、図 17 の結果は図 9 に示す研削に伴う圧縮応力による比誘電率の劣化と研削による材料そのものの構造変化による効果が重なっていると推測される。

4. 結 言

強誘電体である PMN-PT 単結晶 {001} 面に超精密平面研削を施すと共に、試料に単純な圧縮応力を加え、比誘電率に及ぼす加工および圧縮応力の影響を実験的に調べた結果、以下の結論が得られた。

Fig. 17 Relationship between dielectric constant and grinding force

Fig. 18 Nomarski micrograph of {001} PMN-PT surface ground with SD1500-75-J-B diamond wheel

- (1) 研削抵抗は切込みに比例し、研削時間、砥石の粒径および砥石 1 回転当りの送りに依存する。
- (2) 超精密研削加工による加工面表層部のドメインは研削方向に再配向する。
- (3) 比誘電率は、試料厚さ、砥石 1 回転当りの送り、砥石の粒径に依存し、研削方向および切込みには依存しない。
- (4) 超精密研削面の比誘電率は精密研磨面に比べ高く、比誘電率の試料厚み依存性が小さい。
- (5) 比誘電率は試料への圧縮応力により低下し、延性研削の範囲では、研削抵抗が高いほど誘電率の劣化が大きい。
- (6) 砥石 1 回転当りの送りの増加に伴う比誘電率の減少は、熱処理を施すことで回復する。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ダイヤモンド砥石をご提供戴いた(株)アライドマテリアル、PMN-PT 単結晶をご提供戴いた JFE ミネラル(株)、平面研磨盤をご提供戴いた豊田バンモップス(株)に謹んで感謝の意を表します。また、圧電応答顕微鏡像を観察して戴いたエスアイアイ・ナノテクノロジー(株)に厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) T. R. Shrout, Z. P. Chang, N. Kim and S. Markgraf: Dielectric behavior of single crystals near the (1-X) $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_{3-x}$ PbTiO_3 morphotropic phase boundary, *Ferroelectrics Letters Section*, **12**, 3 (1990) 63.
- 2) S. E. Park and T. R. Shrout: Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals, *J. Appl. Phys.*, **82**, 4 (1997) 1804.
- 3) 細野靖晴, 山下洋八: 高効率圧電単結晶材料, *東芝レビュー*, **59**, 10 (2004) 39.

- 4) 松下三芳, 舘義仁, 岩崎洋介: 大口径高変換効率圧電単結晶 PMN-PT, *JFE 技報*, **8** (2005) 43.
- 5) L. M. Ewart, E. A. McLaughlin, H. C. Robinson, J. J. Stace and A. Amin: Mechanical and Electromechanical Properties of PMNT Single Crystals for Naval Sonar Transducers, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **54**, 12 (2007) 2469.
- 6) 芳賀洋一, 松永忠雄, 江刺正喜: マイクロ・ナノマシニング技術を用いた低侵襲性医療機器の開発, *精密工学会誌*, **74**, 11 (2008) 1139.
- 7) S. Zhang and F. Li: High performance ferroelectric relaxor- PbTiO_3 single crystals: Status and perspective, *J. Appl. Phys.*, **111**, 031301 (2012) 1.
- 8) S. Zhang, F. Li, X. Jiang, J. Kim J. Luo and X. Geng: Advantage and challenges of relaxor- PbTiO_3 ferroelectric crystals for electroacoustic transducers – A review, *Progress in Materials Science*, **68**, (2015) 1.
- 9) H. J. Lee, S. Zhang, J. Luo, F. Li and T. R. Shrout: Thickness-Dependent Properties of Relaxor- PbTiO_3 Ferroelectrics for Ultrasonic Transducers, *Adv. Funct. Mater.*, **20**, 18 (2010) 3154.
- 10) H. Takahashi, H. Suzuki and Y. Namba: Surface topography and dielectric properties of polished PMN-PT single crystals, *Annals of the CIRP*, **65**, 1 (2016) 541.
- 11) Y. Namba and H. Takahashi: Ultra-precision surface grinding of PMN-PT relaxor-based ferroelectric single crystals, *Annals of the CIRP*, **59**, 1 (2010) 589.
- 12) 高橋秀彰, 難波義治: 強誘電体単結晶 PMN-PT の超精密平面研削と幾何学的表面評価, *精密工学会誌*, **81**, 8 (2015) 768.
- 13) 松下三芳: 圧電単結晶インゴット及びその製造方法, 並びに, 圧電単結晶素子, 日本国特許, 特開 2009-280413, (2009).
- 14) Y. Namba, R. Wada, K. Unno and A. Tsuboi: Ultra-Precision Surface Grinder Having a Glass-Ceramic Spindle of Zero-Thermal Expansion, *Annals of the CIRP*, **38**, 1 (1989) 331.
- 15) Y. Namba, Y. Yamada, A. Tsuboi, K. Unno and H. Nakao: Surface Structure of Mn-Zn Ferrite Single Crystals Ground by an Ultraprecision Surface Grinding with Various Diamond Wheels, *Annals of the CIRP*, **41**, 1 (1992) 347.
- 16) Y. Namba and M. Abe: Ultraprecision Grinding of Optical Glasses to Produce Super-Smooth Surfaces, *Annals of the CIRP*, **42**, 1 (1993) 417.
- 17) Y. Namba, M. Shiokawa and J. Yu: Surface Roughness Generation Mechanism of Ultraprecision Grinding of Optical Materials with a Cup-Type Resinoid-Bonded Diamond Wheel, *Annals of the CIRP*, **46**, 1 (1997) 253.