

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760118

研究課題名（和文）

ニオブ酸リチウムのマイクロエンドミル溝加工による新規 SAW デバイスの作成

研究課題名（英文） Micro End Milling of Lithium Niobate for fabrication of New SAW device

研究代表者 静 弘生

(Hiroo Shizuka)

兵庫県立大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：80552570

研究成果の概要（和文）：

本研究課題の目的は、ニオブ酸リチウムを SAW デバイスとして用いた新規 μ -TAS の開発である。このことから、ニオブ酸リチウムの切削特性の解明と SAW デバイスの作成を行った。その結果、異方性の強い脆性材料であるニオブ酸リチウムが延性モード切削可能であることを明らかにするとともに、SAW デバイスとして用いるための流路の加工に成功した。また、得られた条件を元にデバイスを作成して実験を行い、本デバイスによる粉体移送実験に成功した。

研究成果の概要（英文）：

This report describes the cutting characteristics of lithium niobate, which is used for surface acoustic wave type micro pumps, regarding the formation of micro grooves by direct cutting. Since lithium niobate is a brittle material with a strong crystal orientation dependency, significant differences were observed in the characteristics of the finished surface according to different directions of cutting. The ductile mode cutting of lithium niobate was found to be feasible with cutting depths of approx. 5 μm or less. Also, results of the study show the feasibility of the formation of minute grooves through the cutting of lithium niobate, using milling with an end mill. In addition, we tried to product MEMS device, and we succeeded in the development of new μ -TAS devices with surface acoustic wave type micro pump using lithium niobate.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

 キーワード：ニオブ酸リチウム，延性モード切削， μ -TAS，Lithium Niobate，ダイヤモンド切削，ダイヤモンドエンドミル，シェーパー加工，弾性表面波

1. 研究開始当初の背景

近年、工業製品の小型化や高性能化に伴い様々な分野においてマイクロデバイスの開発の必要性が高まっており、MEMS や μ -TAS といった分野が注目されている。

例えば流体 MEMS に着目すると、流体 MEMS ではマイクロポンプと呼ばれる極少量の液体を高精度に送液するデバイスを用いて液体の送液や分析を行っている。マイク

ロポンプには色々な種類があるが、中でも近年ニオブ酸リチウムを表面弾性波素子として用いた表面弾性波型マイクロポンプが研究されている。

ニオブ酸リチウムを表面弾性波型マイクロポンプとして使用するためには、ニオブ酸リチウム表面に送液用の微細溝を製作する必要がある、現在この行程はリソグラフィ技術による製作法が研究されている。しかし、

リソグラフィによる製造では製造時間が長いことや、製造コストが高いこと、3次元形状への対応が困難であるといったような問題があるとされている。

2. 研究の目的

切削加工は製作形状自由度が高く、高精度かつ生産効率に優れる加工法であることから既述の問題を改善できることが考えられる。また、リソグラフィによる製造法はレジストを積層させて流路の製作を行うが、表面弾性波が流路に届くまでにレジスト層が障壁となつて波が減衰してしまう可能性がある。しかし、直接切削によって溝を作成した場合、表面弾性波が流路に届くまでに障害物がないため、表面弾性波の伝播効率が增加する可能性がある。

また、最近になって新たにニオブ酸リチウムが液体のみならず粉体の輸送が可能であることや、表面弾性波が反射特性を示すことが明らかになり、ニオブ酸リチウムの表面弾性波素子としてさらなる応用が期待されている。たとえばニオブ酸リチウム表面に切削により微細溝を設けて表面弾性波を反射させることができれば新たなデバイスとしての可能性が生じると考えられる。

以上の背景をふまえ、本研究ではニオブ酸リチウム基板上に直接切削加工を行いマイクロ流路の作製を試みた。

しかしながら、ニオブ酸リチウムは強い結晶方位依存性を持つ脆性材料であることから、切削加工を行った際に仕上げ面に亀裂やクラックなどが生じてしまい良好な加工を行うことは困難であるとされている。ここで、ガラスやシリコンに代表される脆性材料においてはある程度の切り取り厚さ以下では脆性破壊が生じず、一般的な金属材料同様の切削特性を示す“延性モード”による切削が可能であるとされている。

このことから、本研究では旋削とエンドミルによるニオブ酸リチウムの微細溝加工を行い、切削条件や材料の結晶方位依存性が溝性状に及ぼす影響について調査を行った。さらに、エンドミル加工によりマイクロデバイスを製作し、ニオブ酸リチウムの μ -TASとしての可能性について検討を行った。

3. 研究の方法

旋削実験では図1に示す空気静圧主軸を装備した超精密切削加工機（東芝機械、ULC-100A）を用いて単結晶ダイヤモンド工具によるニオブ酸リチウムの旋削加工を行った。また、単結晶ダイヤモンドエンドミル加工の実験ではマイクロエンドミル加工用に製作したエアタービン主軸を持つエンドミル加工機を使用して実験を行った。実験に用いたエンドミル加工機を図2に示す。

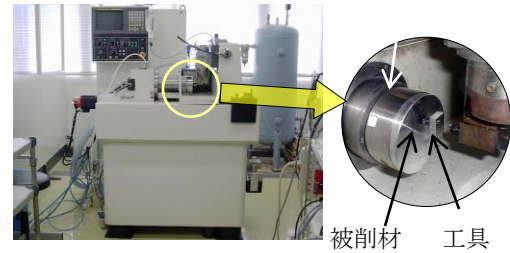


図1 超精密加工機

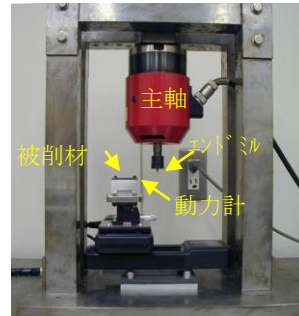


図2 微細加工用エンドミル加工機

4. 研究成果

(1) ニオブ酸リチウムの延性モード切削

脆性材料であるニオブ酸リチウムの延性モード切削の可能性について検討を行った。実験は図3に示すように、ウェハーから切り出した $\square 10\text{mm}$ の試験片を 0.1° の傾斜角で加工機に取り付け単結晶ダイヤモンド工具を用いて1パスのみの溝切削を行い、連続的に切り込みを変化できるように設定した。また、切削方向を 0° から 360° まで 30° ずつ変化させて、異方性が切削特性に影響についても調査した。

実験では、図4に示すように $[0\ 1\ \bar{1}]$ 方向（オリエンテーションフラットに対して水平方向）に切削した時を 0° と定義し、反時計回りを正方向とした。実験に用いた切削条件を表1に示す。

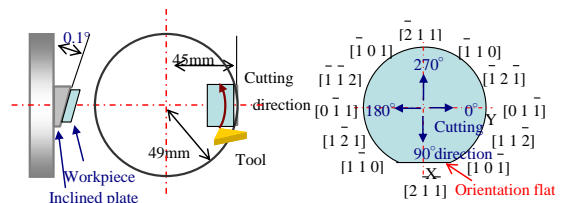


図3 実験方法概略図 図4 切削方向と結晶方位

表1 切削条件

主軸回転数	120000 rpm
切削速度	80 m/min
切削方向	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 deg
工具	Single crystal diamond

切削方向を変化させて加工した時の加工溝の様子を図5に示す。図より、切削方向 0° では切込みが増加しても延性モードによる切削が行えていることが確認出来るが、切削方向 180° では切削直後から仕上げ面にクラックが確認でき脆性モードである事がわかる。また、 90° や 270° ではある程度の切込みまで延性モードで切削が行えているものの、徐々に仕上げ面に荒れやクラックが発生成長することにより脆性モードに変化していることが見て取れる。また、クラックは図中に矢印で示すようにすべて同じ方向（オリフラに垂直方向）に進展し、この方向は全てニオブ酸リチウムの滑り方向 $[2\ 1\ 1]$ と一致する結果となった。

切削試験から得られた脆性モードと延性モードの切り込み境界値を図6に示す。図より、 $60^\circ \sim 300^\circ$ までの間ではニオブ酸リチウムを延性モードで切削できるのはおよそ $5\mu\text{m}$ 以下の切り込みであることがわかった。また、 $330^\circ \sim 30^\circ$ の間では境界切り込みは約 $50\mu\text{m}$ であり、他の条件に比べ10倍ほど延性モードによる切削可能切込み量が大きいことがわかった。

以上の結果よりニオブ酸リチウムは延性モード切削が可能であるが、延性-脆性モードの境界切り込み量は切削方向の影響を強く受けることが判明した。



図5 切込みを連続的に変化させた時の加工溝

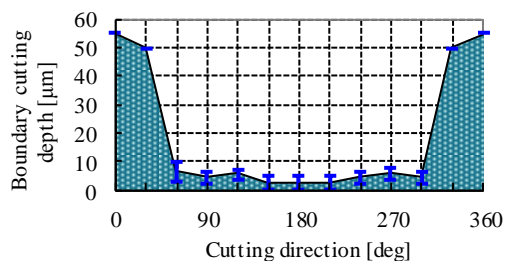


図6 切削方向を変化させたときの延性モード切削可能な境界切込み

(2) 単結晶ダイヤモンドエンドミルを用いた微細溝加工

前章の実験結果を踏まえ、単結晶ダイヤモンドエンドミルを用いた微細溝加工実験を

行った。エンドミル加工では、切削形態が旋削加工と異なることから前章同様に送りや切込み、切削方向を変化させて加工溝性状の差異の検討を行った。実験に用いた切削条件を表2に示す。

表2 切削条件

主軸回転数	120000 rpm
切込み	1, 10 μm
送り	0.1, 1, 10 μm
切削方向	0, 180 deg
工具	単結晶ダイヤモンドエンドミル
工具径	0.1mm

送りと切込みを変化させた時の加工溝を図7に示す。図より、送りが $0.1\mu\text{m}/\text{tooth}$ や $1\mu\text{m}/\text{tooth}$ では溝のエッジ部にあまり変化は見られないが、送り $10\mu\text{m}/\text{tooth}$ ではエッジ部に大きな欠けが生じていることがわかる。また、切込みについても切込み $10\mu\text{m}$ で大きな欠けが生じる結果となった。溝底面に関しても、図8よりエッジ部分と同様の結果を示し切込みと送りが増加するほど底面の仕上げ面粗さが低下することがわかった。さらに、切削方向については、底面とエッジ部ともに 180° 方向よりも 0° 方向の方が良好な結果となり、旋削加工の結果と同様の傾向にあることがわかった。

切込み [mm]	送り [$\mu\text{m}/\text{tooth}$]	0	180
1	0.1		
	1		
	10		
10	0.1		
	1		
	10		

図7 切削条件と溝性状の関係

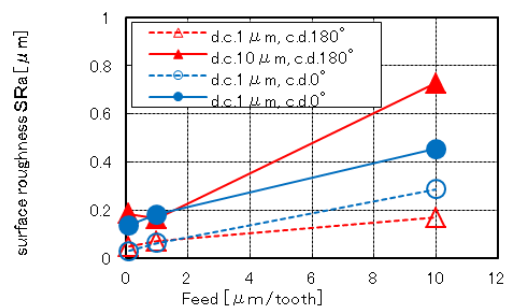


図8 送りと仕上げ面粗さ

切込みと送りの実験結果を踏まえ、 μ -TAS デバイスとして用いるための深さ $100\mu\text{m}$ の微細溝加工を行った。切削条件は最も溝性状が優れていた送り $0.1\mu\text{m}$ 、切込み $10\mu\text{m}$ とした。切込みは $10\mu\text{m}$ を 10 回繰り返して、 $100\mu\text{m}$ の溝加工を行った。実験結果を図 9 に示す。図より、ほとんど加工溝に欠けは生じず、デバイスとして用いるのに十分な溝を加工することが出来た。また、図 10 に示す加工後の工具の観察写真より、単結晶ダイヤモンドエンドミルにほとんど摩耗は見られなかった。

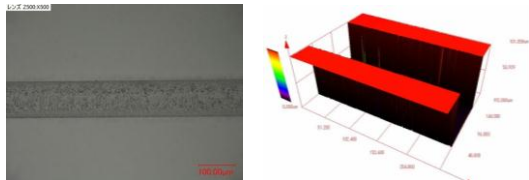


図 9 溝深さ $100\mu\text{m}$ の加工溝の顕微鏡写真とレーザ顕微鏡による 3D 形状

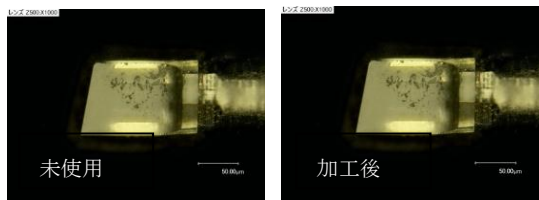


図 10 加工後の工具摩耗の顕微鏡写真

$100\mu\text{m}$ の溝深さまでエッジ部に欠けのない良好な溝が加工できたことを踏まえ、次に切削方向を変化させて溝加工を行い、加工溝性状について調査を行った。切削条件は前項同様の条件を用いた。

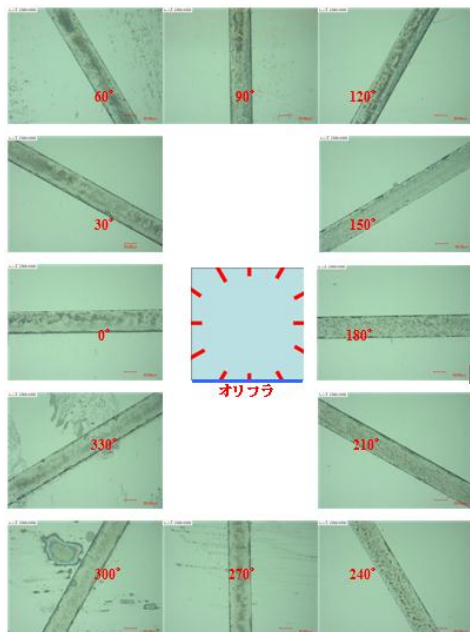


図 11 単結晶ダイヤモンドエンドミルによる切削方向と溝性状

既述の旋削加工では、ニオブ酸リチウムの切削において、切削方向が変化すると被削材の異方性の影響からある角度においては欠けが生じていたが、図 11 に示すように、単結晶ダイヤモンドエンドミル加工では、切削方向を変化させても欠けの生じない溝加工が出来た。加工溝底面の仕上げ面粗さを図 12 に示す。図より、いずれの角度においても $Ra50\text{nm}$ 以下の良好な仕上げ面粗さが得られていることがわかる。

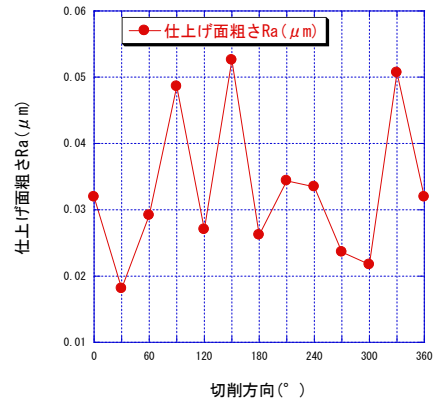


図 12 加工溝底面の仕上げ面粗さ

これらの結果を踏まえ、 μ -TAS デバイス制作に向けて曲線加工を試みた。切削条件は前実験と同様で、 $\phi 2\text{mm}$ と $\phi 5\text{mm}$ の円弧を加工した。結果を図 13 に示す。図より、曲面加工においても欠けのほとんど見られない微細溝の加工が出来た。

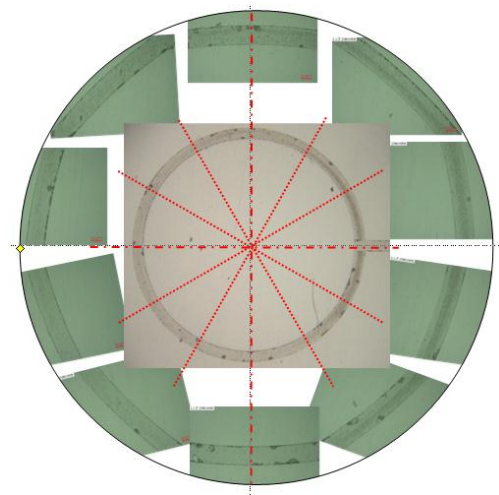


図 13 円弧形状加工による顕微鏡写真

(3) SAW による粉体駆動実験

これまでの実験で得られた条件を基に微細溝をデバイス上に加工し、SAW の反射実験を行い反射波による粉体の輸送を試みた。図 14 に粉体駆動実験の概略図を示す。信号発生器で発生させたバースト電圧 (基本周波数

19.2MHz, 端数 1000, 繰り返し周波数 1kHz) を LN 基板上に作製された IDT (ピッチ 200 μm , 開口幅 5mm, 対数 20) に印加することで SAW を発生させ, 比重 8.9 の銅粉の輸送を試みた.

溝角度 30° における実験結果の例を図 15 に示す. 図より SAW の反射波により銅粉が移動していることがわかる. これにより作製した微細溝が SAW を反射させデバイスとして適切に作動することが確認された.

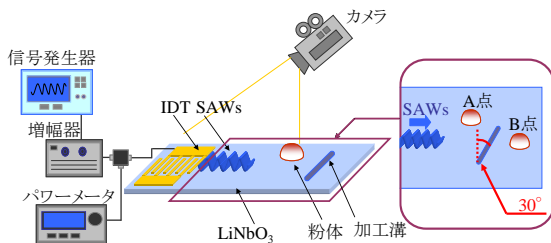


図 14 粉体駆動実験の概略図

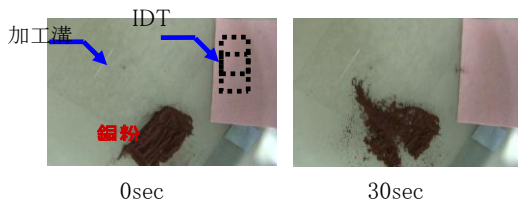


図 15 SAW の反射波による銅粉の移動

まとめ

本研究課題では, 新規 μ -TAS デバイスの開発に向けて, ニオブ酸リチウムの切削特性の解明とデバイスの作成を行い以下の結果を得た.

①ニオブ酸リチウムの切削特性の解明

ダイヤモンド旋削による延性モード切削の可能性

- ・各切削方向において延性モード切削が可能な切込み量を明らかにした.
- ・異方性の影響より, 切削方向を変化させると仕上げ面性状に違いが見られた

ダイヤモンドエンドミル加工による微細溝加工

- ・良好な溝底面とエッジ部分を得る切削条件を明らかにした.
- ・欠けのほとんど生じない曲面加工を達成した.

② μ -TAS デバイスの作成

- ・切削加工溝による SAW の反射と銅粉体の送粉が確認された.

以上の結果より, 本研究によってニオブ酸リチウムを材料とした μ -TAS デバイスを作成することが可能となった.

これは, 国内のみならず海外においても未

だ報告例のない事であり, 本研究の国内外における新規性及び影響は大きいものであると考えられる.

応用例として, 例えば医療分野では DNA の解析や血液の分析への応用が期待できる. 血液の分析では, 採血量が少なく, かつ分析速度と精度の高いデバイスの開発に繋がるものであると考えられる. また, 微量な液体や粉体を輸送・攪拌・分析等の MEMS 開発に繋がることから, 試薬の開発等に用いられる MEMS 技術への応用ができる技術であると言える. さらに, MEMS, バイオ, 分析分野では新たな分析システムの開発の可能性が広がると考えられ, 例えば, 火星探査機の微小サンプル回収, 分析装置への応用が期待できる.

以上のことより, 本研究の成果は μ -TAS や MAMS 分野に幅広く貢献できるものであると言える.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. 奥田孝一, 静 弘生, 超精密・微細切削加工システムと加工特性, 計測と制御, 査読なし, Vol. 52, No. 1, 2013, pp. 11-16
2. 静 弘生, 奥田孝一, 布引雅之, 李偉, 稲岡孝信, 才木常正, 内海裕一, ニオブ酸リチウムの延性モード切削に関する研究, 砥粒加工学会誌, 査読あり, Vol. 56, No. 2, 2012, pp. 118-123
3. Hiroo Shizuka, Koichi Okuda, Masayuki Nunobiki, Wei Li, Study on the ductile mode cutting of LiNbO3 wafer for fabrication of SAW device, International Journal of Abrasive Technology, 査読あり, Vol. 55, No. 12, 2011, pp. 191-203
4. T. Saiki, H. Tomita, H. Shizuka, K. Okuda, K. Maenaka, Y. Utsumi, Reflected Surface Acoustic Wave Actuator Using Micro Groove, Proc. of 37th International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE2011), 査読あり, 2011, p. 490

[学会発表] (計 2 件)

1. 静弘生, マイクロエンドミルを用いたニオブ酸リチウムの微細溝加工に関する研究, 精密工学会春期大会学術講演会, 2013年3月13日, 東京工業大学
2. Yasuto Arisue, Proposal of Particle Size Sorting Method by Surface Acoustic Wave, 25th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2012), 2012年10月11

日2日,神戸メリケンパークオリエンタルホテル

3. T. Saiki, Direction Control of Powder Transport on Solid Substrate by Drive Frequency of Surface Acoustic Wave Actuator, International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE2012), 2012年9月17日, トウールーズ・フランス
[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計1件)

名称: 表面弾性波発生装置
発明者: 内海裕一, 才木常正, 静 弘生, 奥田孝一
権利者: 兵庫県
種類: 特許
番号: 特願 2011-203952
出願年月日: 平成23年9月19日
国内外の別: 国内

- 取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

静 弘生 (Hiroo Shizuka)
兵庫県立大学・工学(系)・研究科(研究院)・助教
研究者番号: 80552570

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

- ①奥田孝一 (Koichi Okuda)
兵庫県立大学・工学(系)・研究科(研究院)・教授
研究者番号: 50124061

- ②布引雅之 (Masayuki Nunobiki)
兵庫県立大学・工学(系)・研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 50244687

- ③内海裕一 (Yuichi Utsumi)
兵庫県立大学, 高度産業科学技術研究所, 教授
研究者番号: 80326298

- ③才木常正 (Tsunemasa Saiki)
兵庫県立工業技術センター, 情報技術支援部, 主任研究員
研究者番号: 80470227