

# ラム波理論によるギガヘルツ振動子の開発\*1

—水晶基板のマイクロ加工技術に関する研究\*2—

橋田 鉄雄・山田 博之・西村 通喜・勝又 信行・宮本 博永

## The development of GHz resonator based on Lamb wave theory\*1

—Study on Micro Fabrication Technology for Quartz Crystal\*2—

Tetsuo KITTA and Hiroyuki YAMADA and Michiyoshi NISHIMURA, Nobuyuki KATSUMATA, Hironaga MIYAMOTO

### 要 約

本研究は産学官の連携体制のもとに、振動理論の一種である「ラム波理論」に着目した新しい高周波帯向けの水晶振動子の開発を行った。この技術を開発する課題として、山梨県工業技術センターでは、1. 構造解析による水晶素板の最適形状設計、2. ドライエッチングならびにブレード対応型ELID装置による水晶の微細加工技術について研究を行った。

その結果、水晶素板の中心部分（発振部分）のみを薄膜化する、段付き形状にすることにより、外力の影響を受けにくい構造となることが明らかになった。

一方、ドライエッチングならびにブレード対応型ELID装置による加工では、それぞれの機器における最適加工条件を見いだすことができ、水晶素板の微細加工技術として有効であることが確認できた。

### 1. 緒 言

現在、ITの進歩に伴い水晶振動子の高周波化が求められている。そして、水晶振動子の高周波化のために水晶素板の小型化・薄型化が進められているが、一例としてはバルク波による振動子では1GHzの周波数を得るためには厚さを約 $1.7\mu\text{m}$ 以下に加工しなければならず、各方面でその加工技術の開発が取り組まれている。しかし、従来のバルク波や弾性表面波による振動子では実現困難な課題が多い。そこで、高周波の振動子を得るためにラム波に着目し、この理論を薄型的水晶素板に適用して実用可能なギガヘルツ振動素子の開発に取り組んだ。これらの開発段階において、水晶素板は小型化・極薄化によって強度の低下が予想され、製造上や実用上での外力や衝撃力に対する水晶素板の機械的強度が問題となる。

一方、このラム波理論による水晶振動子が実現することで、より高性能な振動子を開発することが可能となるが、水晶素板の高精度加工技術は必要不可欠な技術であることに変わりはない。

そこで本研究では、板厚寸法などに対して表面積が非常に大きい3次元薄肉形状に有限要素法を用いることは難し

い点もあるが、機械的強度のシミュレーションを試み、形状設計への適用性についての検討を行い、薄型化に最適な水晶素板形状を検討した。また水晶振動子をはじめとする水晶の加工分野の高精度化は必須であることから、水晶素板に対しドライエッチング加工ならびにブレード対応型ELID装置による研削加工を行い、水晶素板の高精度加工技術としての可能性について検討を行った。

### 2. 実験方法

#### 2-1 構造解析による形状設計

本解析では、ATカット水晶素板について検討を行った。水晶素板は円盤状で内側部分が薄くなっている段付き円盤の形状、すなわち逆メサ構造の形状とし、Yカットに対して $35^\circ$ 回転した角度 $\theta$ での解析モデルすなわち水晶振動子として多く用いられているATカット水晶素板について検討した。また、本解析に用いた水晶および金属の材料特性値を表1に示す<sup>2)</sup>。

各部の寸法を図1に示す。水晶素板の外径はパッケージへの取り付けを考慮し $\phi 5.1\text{mm}$ とし、内側薄膜部直径は外径および発振を考慮し $\phi 1\sim 3.5\text{mm}$ 、外周部の厚さはエッチング加工の前工程であるポリッシュ加工を考慮し $40\sim 100\mu\text{m}$ 、内側薄膜部の厚さはバルク波を用いた場合で $150\text{MHz}\sim 1\text{GHz}$ の発振周波数となる厚さである $1.7\sim 11\mu\text{m}$ の寸法範囲で解析を実施した。

\*1 平成12年度地域新生コンソーシアム事業として実施

\*2 本研究は、紙面の都合上、山梨県工業技術センターで実施した研究成果について記載した

また本解析では、水晶素板に一定荷重が加わった場合の片持ち曲げ変形、強制変位が加わった場合の片持ち曲げ変形、内側薄膜部に面圧が加わった場合について静的線形解析と、水晶素板を垂直状態・水平状態および傾いた状態で金属面に落下させた場合について時刻歴の構造非線形解析を行った。

表1 解析で使用する物質の材料特性値

	水 晶	金 属
ヤング率 [GPa]	77.9 (X,Y) 102.8 (Z)	210
ポアソン比	0.135	0.292
密度 [Kg/m <sup>3</sup> ]	2660	7860
引張り強さ [MPa]	156.8 (X,Y) 127.4 (Z)	

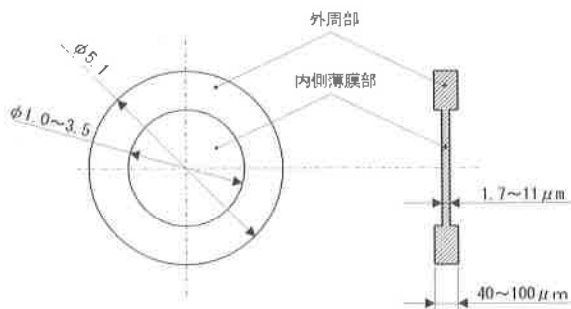


図1 解析モデルと寸法

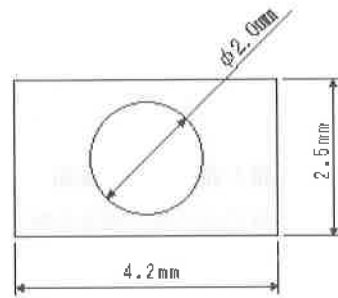
### 2-2 ドライエッチングによる水晶素板の加工

加工物は、STカット水晶素板ならびにATカット水晶素板を用いた。水晶素板へのマスク作製は、高周波スパッタリング装置（アルバック機工製RFS200）を用い、ターゲット材はWSi（タングステンシリサイド）を用いて、所定の膜厚（約2μm）までスパッタを行い、図2に示すようなエッチングマスクとした。

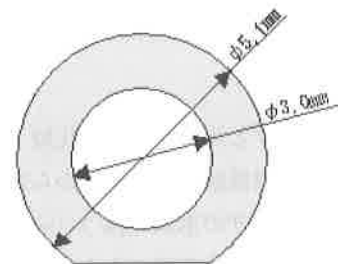
ドライエッチングには、平行平板方式の反応性イオンエッチング装置（サムコインターナショナル研究所製 RIE-200L）を用いた。

ドライエッチングでは、印加する高周波出力、反応ガスとガス流量、処理圧力などがエッチング速度と加工面に影響を及ぼす主な要因である。そこで、いくつかの予備実験の結果から、表2に示す加工条件を設定した。

また加工深さの測定には、表面粗さ計（小坂研究所製）を、加工物の観察には実体顕微鏡ならびに電子顕微鏡（日本電子製 JXA-8900RL）、加工面の評価には光学式表面粗さ測定器（WYKO製TOPO3D）ならびに平面度測定器（ZYGO製 レーザ干渉計 GPI-XP）を用いた。



STカット素板のマスク寸法



ATカット素板のマスク寸法

図2 作成したマスク形状

表2 エッチング条件

水晶素板	STカット素板,ATカット素板
反応ガス	CHF <sub>3</sub>
ガス流量	20 (secm)
マスク材料	WSi (厚さ約2μm)
高周波出力	240 (W)
処理圧力	2.5~15 (Pa)

### 2-3 ブレード対応型ELID装置による微細加工

本研究では、マイクロジェネレータSMG-20P用にELID装置を製作し、水晶ウエハーへのELID研削加工実験を行った。STカット水晶ウエハーに、#2000,#4000,#8000铸铁ボンド砥石によるクリープフィード研削を行い、原子間力顕微鏡により加工面を観察した。また、実際の目的となっている水晶ウエハー上に形成された多数個の振動子を切断することを想定し、ハイスピードストローク研削により水晶ウエハーへのダイシング加工を試みた。加工面の観察には電子顕微鏡を用いた。

## 3. 結果

### 3-1 構造解析による形状設計

#### 3-1-1 解析要素タイプの検討

はじめに解析要素（SHELL要素と3D-SOLID要素）について、3次元薄肉平板の解析への適用性を比較した。今回のモデルのように中央部分で厚さが薄くなっている形状の場合、SHELL要素では厚み方向の違いの影響、すなわ

ち段差部分の影響が大きく現れなかった。したがって、今回の解析では3D-SOLID要素を用いて解析を行うこととした。

### 3-1-2 結晶軸と曲げ方向の関係

ATカット水晶素板において、水晶素板を片持ち曲げ変形させた静的強度解析を実施した場合、結晶軸に対して曲げる方向を変化させたが、変位や発生する応力値に大きな違いはみられなかった。この結果から、ATカット水晶素板における結晶軸に対する機械的強度への依存性は小さいことがわかった。

### 3-1-3 両メサと片メサ形状の比較

図3のように、内側薄膜部分を両面から加工し厚み方向に対称形状である両メサの形状(図3(a))と片面のみから加工し厚み方向に非対称形状である片メサの形状(図3(b))について、水晶素板を曲げ変形させた場合の強度の違いを検討した。

図4に水晶素板を片持ち曲げ変形させた静的強度解析の解析結果の応力分布図を示す。図4のように外周部における応力分布は両者ともほぼ同じであるが、両メサ形状の方が外周部の厚い部分へ加わった外力の影響を内側薄膜部分が受けにくい形状であることがわかった。

### 3-1-4 外周部に外力が加わり曲げ変形した場合

製造における作業時を想定し、外周部の先端に9.8mNの一定荷重が加わり片持ち曲げ変形が生じた場合について静的強度解析を行い、外周部厚さと発生する応力との関係について検討した。その結果、図5に示すとおり外周部の厚さが薄くなるほど発生する応力値は大きくなり、外周部の厚さが50~60 $\mu\text{m}$ 以下になると急激に強度が低下する傾向がみられた。

次にパッケージへの組付けを想定し、外周部の先端に0.1mmの強制変位が加わり片持ち曲げ変形が生じた場合について静的強度解析を行い、外周部厚さと発生する応力との関係について検討した。その結果、外周部の厚さが厚くなると最大応力値は増大する傾向を示した。これは、外周部の厚さが厚くなると剛性が高くなるためであると考えられる。

また、上記2つの片持ち曲げ変形が生じた場合について、内側薄膜部の厚さと発生する応力との関係についても検討した。その結果、図6に示すとおり内側薄膜部の厚さが変化しても薄膜部の応力値は変化せず、その値は外周部に生じる応力値の約1/4であることが確認できた。

したがって、内側薄膜部の厚さに比べて外周部の厚さが

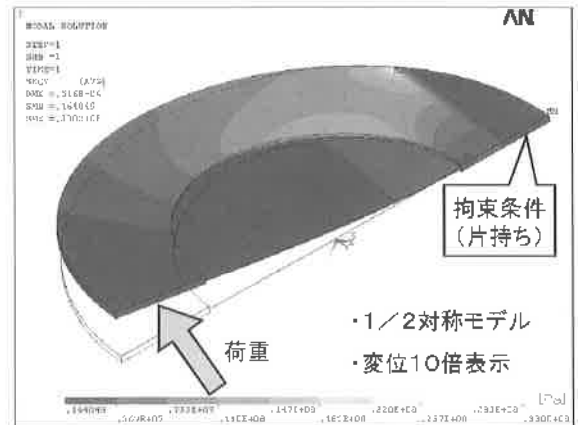


(a) 両メサ形状の断面図(対称形状)

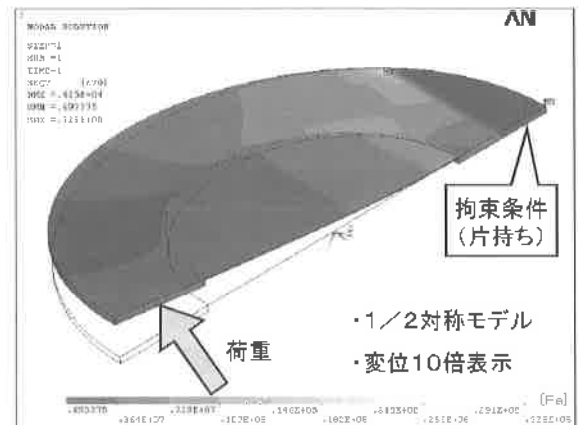


(b) 片メサ形状の断面図(非対称形状)

図3 両メサ形状と片メサ形状の断面図



(両メサ形状の場合)



(片メサ形状の場合)

図4 解析結果の応力分布図の比較

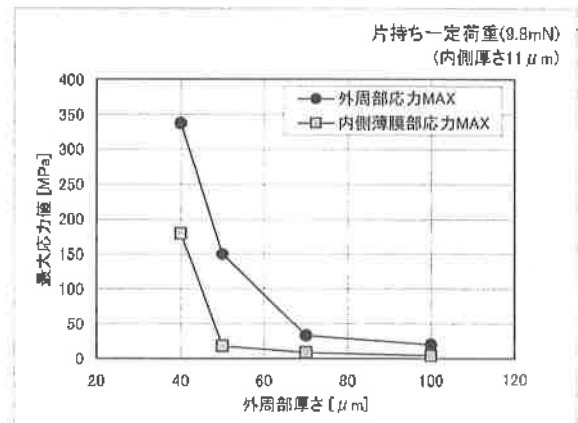


図5 一定荷重における外周部厚さと応力の関係

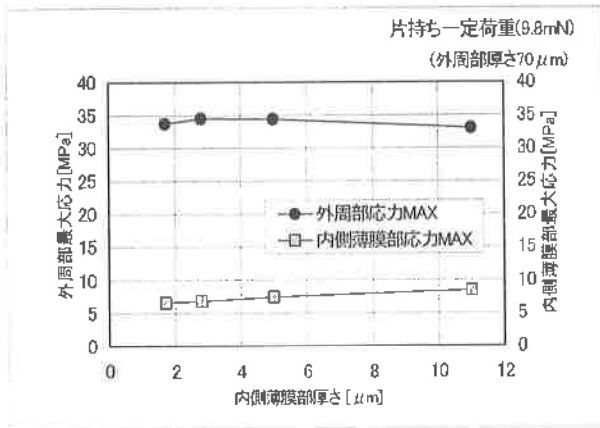


図6 一定荷重における薄膜部厚さと応力の関係

十分あり、内側薄膜部に直接外力が加わらない場合には、外周部で外力に対する強度を保持し内側薄膜部へ外力が及ぼす影響が小さいことがわかる。

3-1-5 内側薄膜部へ面圧が加わった場合の解析

ウェットエッチングなどの加工時や作業時を想定して、外周部を固定し内側薄膜部に面圧138Pa（薄膜部直径がφ3mmの場合で総荷重1mN）を負荷した場合について静的強度解析を行い、内側薄膜部の厚さと発生する応力との関係について検討した。

その結果、図7に示すとおり薄膜部の厚さが薄くなると最大応力値は大きくなる傾向を示し、厚さ5μm以下になると著しく強度が低下する傾向がみられた。

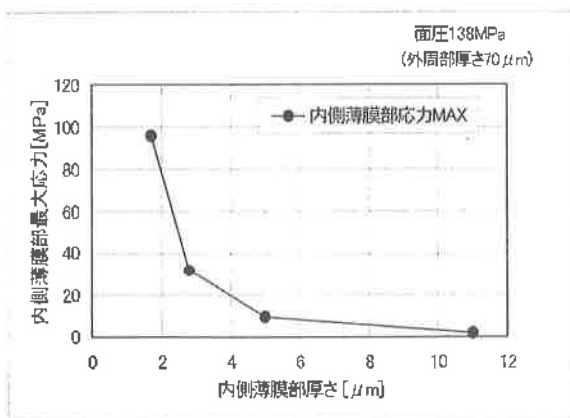


図7 面圧負荷における薄膜部厚さと応力の関係

3-1-6 金属面に落下した場合の衝撃解析

水晶素板が垂直状態で金属面に落下した場合を想定し、自重を考慮し高さ100mmからの自由落下に相当する初速度1.4m/sで金属面に衝突した時の時刻歴解析を行い、外周部厚さと発生する応力との関係について解析した結果を図8および図9に示す。外周部に発生する応力は、金属面と

の衝突部分に集中しており、その最大応力値は外周部分の厚さが薄くなると増加する傾向がみられ、これは金属面と衝突する接触面積が小さくなるためであると考えられる。

この解析結果や、図5に示すような外周部に外力が加わり曲げ変形した場合の解析結果から外周部の厚さは約60μm以上あることが望ましいが、ポリッシュ加工後の水晶素板の内側部分をエッチングなどによって除去加工する加工効率や加工精度などを考慮すると薄い方が有利であることから、外周部の厚さは60~70μmの範囲が望ましい。

ただし、本解析では衝撃の作用時間が非常に短く、応力が極めて集中しているため最大応力値の絶対値の信頼性はやや低いと推測される。また、実際の現象では空気抵抗が存在するが、解析で空気抵抗を考慮することは非常に難しく、本解析では考慮していないため、計算結果の値と実際とはやや異なることも予想される。したがって、落下衝撃における現象の把握や形状ごとの比較評価とした。

次に、水晶素板が水平状態で金属面に落下した場合を想定し、上記と同一条件で時刻歴解析を行い、内側薄膜部の厚さと発生する応力との関係について検討した。その結果、薄膜部分の厚さが薄くなると、衝撃による変位量は増加するが、薄膜部分に発生する応力の最大値には著しい変化はみられなかった。また、最大応力値が発生する位置は薄膜部の中央部分であった。

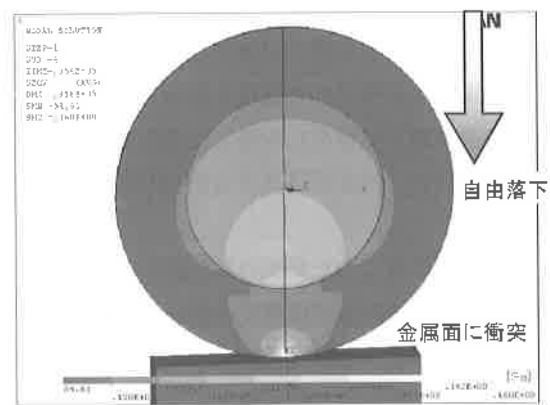


図8 解析結果の一例（応力分布図）

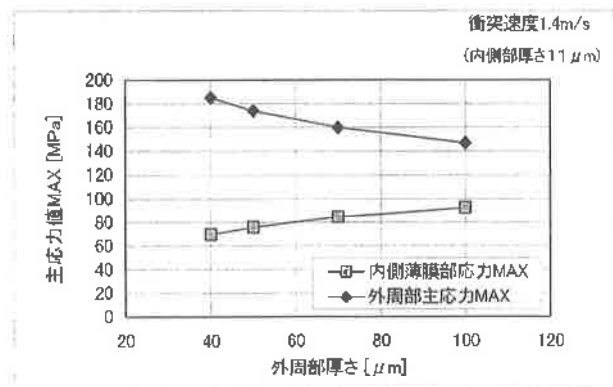


図9 垂直落下における外周部厚さと応力の関係

さらに、水晶素板が $35^\circ$  傾いた状態で落下し初速度1.4m/sで金属面に衝突した場合の挙動および応力状態を予測した。この場合、解析する現象時間が長いため陽解法を用いた時刻歴解析を行った。その結果、外周部は水晶素板の端部が金属面に最初に衝突した時に応力値が最大となり、一方、水晶素板の内側薄膜部では最初の衝突直後に自転により水晶素板の反対側端部が金属面に衝突した時の応力値が最大となり、その位置は水晶素板の中央付近であった。また、内側薄膜部の厚さが薄くなると発生する応力は大きくなり、特に厚さが $5\mu\text{m}$ 以下になると急激に破壊しやすくなる傾向がみられた。

### 3-1-7 内側薄膜部分の直径と強度との関係

上記の片持ち曲げ変形や落下衝撃解析を行い、水晶素板の内側薄膜部分の直径と発生する応力との関係について検討した。その結果、薄膜部分の直径が小さくなると、水晶素板を水平状態で落下した場合に発生する応力値は小さくなり、また外周部へ外力が加わり片持ち曲げ変形した場合にも外周部分の剛性が高くなったことにより強度は上がる傾向がみられた。一方、傾いた状態で落下した場合には直径が小さくなると応力値が増加する傾向がみられた。したがって、発振の振動特性を考慮し内側薄膜部分の直径は $\phi 3\text{mm}$ が最適である。

### 3-1-8 内部短冊型と全面型との比較

ラム波を用いた共振子への適用を目的に、水晶素板形状である内側薄膜部を短冊型に変型した形状について上記と同様の解析を行い、内部薄膜部が全面型の場合と解析結果を比較評価した。

図10に内部短冊型にした形状の解析結果の一例を示す。

その結果、内部短冊型では多くの場合、図10のように内部薄膜部と外周部との境界付近すなわち内部短冊部の隅や縁で応力が集中し最大応力値が発生している。また、内部

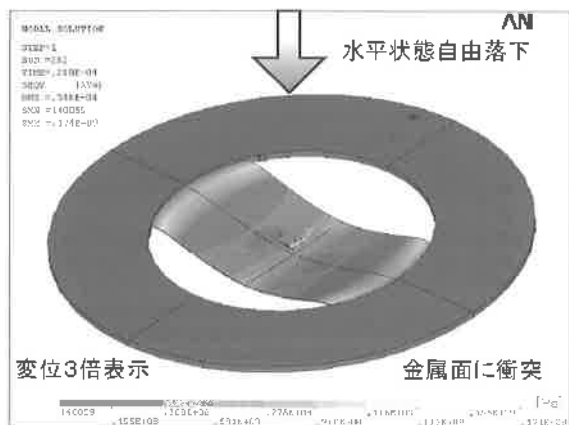


図10 水平状態で落下した時の解析結果 (応力分布)

短冊型は薄膜部の短辺方向に曲げ変形した場合、薄膜部分に直接面圧が加わった場合および傾いた状態で落下した場合には、衝撃によって生じた最大応力値が全面型に比べ約2~6倍であった。したがって、内部短冊型では、薄膜部分が全面型よりも破壊する危険性が非常に高いことが予想されるので、今後はさらに形状を改良することが必要である。

## 3-2 ドライエッチングによる水晶素板の加工

### 3-2-1 エッチング速度と表面粗さ

ドライエッチング加工では、実験方法で示したエッチング条件により加工を行い、評価を行った。

図11に各加工条件での処理圧力とエッチング速度の関係を示す。エッチング速度は処理圧力により変化し、高周波出力240Wでは処理圧力6.7Paで最高約46nm/min、200Wでは5.0Paで最大となり、その前後の処理圧力ではエッチング速度は低下する傾向を示した。

一方、ATカット素板の場合でも、エッチング速度は、7.5Paで最大の約46nm/minであり、STカット素板と同様に15Paでは約28nm/minまで低下した。この結果からエッチング速度はSTカットとATカット素板のいずれにおいてもほぼ同様の傾向を示し、ウェットエッチングで問題となる、結晶方位によるエッチング速度の相違<sup>3)</sup>は認められなかった。

この結果からエッチング速度は最高で約45nm/minであることから、 $30\mu\text{m}$ の加工を行うためには約12時間、また $50\mu\text{m}$ の加工では18時間以上の加工時間が必要である。

またこれらの加工を行った場合にも、WSiマスク (初期厚さ約 $2\mu\text{m}$ ) は残っており、いずれの条件でも選択比 (加工物の除去量/マスクの除去量) は15以上であり、長時間の加工が可能であることが確認できた。

図12に加工部分の電子顕微鏡写真を示す。加工部分はほぼ垂直な断面が得られ、異方性エッチングが行われている様子が確認できた。また加工断面は処理圧力などに関係なく、いずれの加工条件でも同様のほぼ垂直の断面であった。

図13に各処理条件で加工を行った際の加工面の表面粗さをWYKO TOPO3Dで測定した結果を示す。表面粗さは、処理圧力が240Wでは7.5Pa、200Wでは5.0Paまでは $R_a 1\text{nm}$ 前後の加工面であったが、それ以上の処理圧力では徐々に悪化する傾向を示した。またSTカット素板とATカット素板では、P-V値が大きく変化する傾向を示した。

図14にATカット素板の加工面を電子顕微鏡で観察した結果を示す。表面粗さ測定結果で明らかなように、処理圧力7.5Paでは加工面は非常に平滑であるのに対し、処理圧力15Paで加工を行った場合には、表面に多数のピットが全

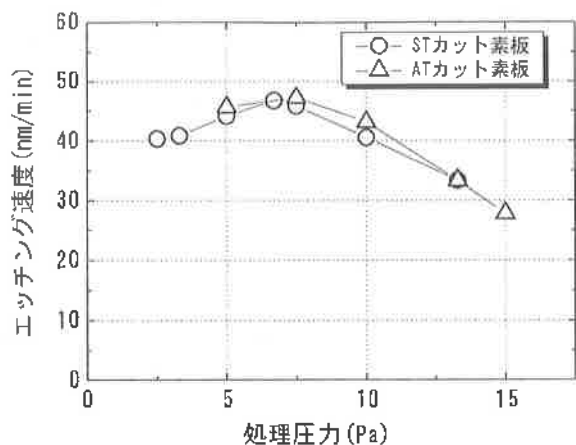
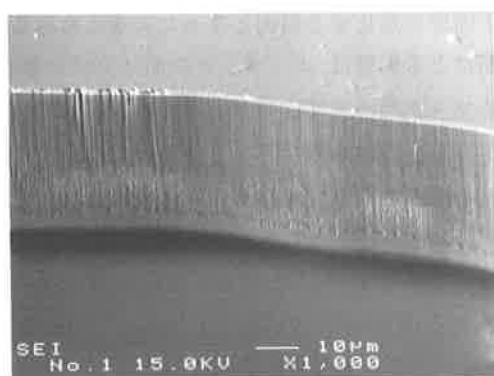


図11 処理圧力とエッチング速度の関係



処理圧力7.5Pa

図12 加工部分の観察結果

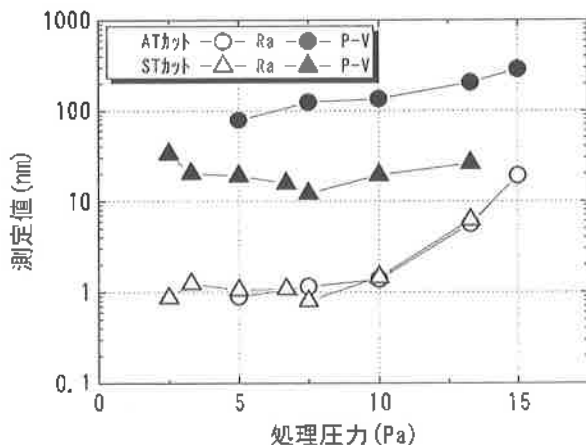


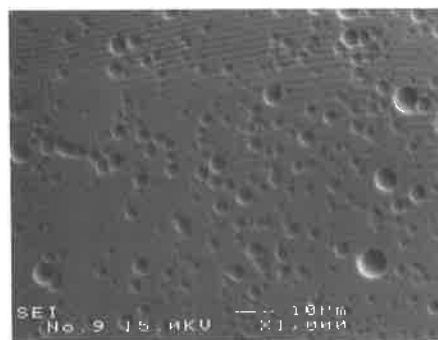
図13 処理圧力と表面粗さの関係

域にわたり観察され、加工面が非常に荒れている様子が確認でき、これによりP-V値が大きくなった原因であると考えられる。

このカット方向の違いによるP-V値の差は、それぞれの素板の仕上げ状態が異なるためではないかと考えられる。今回加工を行ったSTカット素板はポリッシュ仕上げであるのに対し、ATカット素板では周波数を微調整するためにウェットエッチングによる仕上げを行っており、このときに発生する微小なエッチピットが、ドライエッチング加



(a) 処理圧力7.5Pa



(b) 処理圧力15Pa

図14 加工面の観察結果

工時に拡大し、それが特に処理圧力が高い条件では、より大きく影響したのではないかと考えられる。

一方、処理圧力とエッチング速度および表面粗さの関係は、次のような反応槽内での反応によるものと考えられる。本研究で使用している反応ガス ( $\text{CHF}_3$ ) は、プラズマ中で分解する際に、反応に寄与するエッチャーの他にC-F系のポリマーを生成する。この生成したポリマーは基板上に堆積し、保護膜としても作用する。このため $\text{CHF}_3$ ガスによる加工では、この堆積物を除去するために別の反応もしくはイオン衝撃を加える必要があるが、基板上に堆積したポリマーはマスクとして機能することになる。反応槽内の処理圧力を高めることは、反応槽内のガス粒子数が増加することであり、より多くのポリマーが生成し、被加工部により多くのポリマーが堆積するため、エッチング速度が低下し、このポリマーの堆積と除去が同時に進行するため加工面の荒れの原因になる。一方、低圧力側 (2.5Pa) ではエッチングに寄与するラジカルの減少やイオン密度が低下するためエッチング反応そのものが起きにくくなり、エッチング速度が低下したと考えられる。

### 3-2-2 加工後の平面度測定結果

加工後の平面度を測定した結果を図15に示す。本研究で用いたWSiマスクは、膜内部の応力が大きいために厚さが約 $330\mu\text{m}$ のSTカット素板でも未処理状態でも図15 (a)に示すように $\phi 2\text{mm}$ 部分に反りが生じてしまっていた。

一方、加工後の平面度は、処理圧力2.5Paでは中央部が窪んだ形状ではあるが、処理圧力が高くなるに従ってその形状は凸型になる傾向を示し、それに伴いP-V値（最大高低差）も悪化する傾向を示した。

以上のようなエッチング速度、表面粗さ測定結果から、本研究では加工ガスにCHF<sub>3</sub>、ガス流量20sccm、処理圧力5～7.5Pa、高周波出力240Wが最適な加工条件であると考えられる。そこで、この条件を用いて加工時間を延長し、より深い加工を行った。加工時間は、最長で21時間である。

表3に加工時間と加工面の表面粗さ測定結果を示す。この結果から加工時間が長時間化しても加工面粗さは大きく変化せず、良好な加工面が維持できていることが確認できた。

この素板に対し、加工部分の平面度の測定を行った。測定には、(a) 加工時間12時間（加工量約28.5μm）と

(b) 21時間（加工量約51μm）の素板を用いた。そのときのATカット水晶素板の外観写真を図16 (a-1), (b-1) に、平面度測定結果を図16 (a-2), (b-2) に示す。

測定結果は (a) 加工時間12時間で5196nmであり、また一部未計測部分（完全な円形に測定できていない）のに対し、(b) 21時間では全面で計測でき、かつ値も311nmと大きく変化し、またいずれの値もSTカット素板と比較し、大きく悪化していることが明らかとなった。

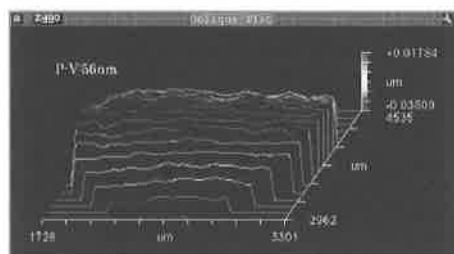
このことは、STカット素板と同様にWSiマスク形成時に素板中に大きな歪みが生じるが、ATカット素板ではもとの素板の厚みが薄い（約68μm）ため、STカット素板と比較してもより大きな歪みを生じさせ、その結果、STカット素板では影響が少なかったが、ATカット素板では加工面の平面度が悪化する原因となったと考えられる。また加工時間による影響は、エッチング初期はマスク量が厚く、そのためマスク内の内部応力が大きく影響し、素板自体に大きな歪みを生じさせるが、エッチングが進行するにしたがい歪みの原因となるマスクも徐々に除去され、それに従い変形も緩和されたと考えられる。実際に加工後の素板の観察結果においても (a-1) のように12時間の試料ではほぼ全域にマスクが残っているのに対し、21時間経過後 (b-1) では、マスクがほぼ除去されている。

以上のことから耐久性のあるWSiマスクを用いた場合でも、加工後にこのマスクを除去することで加工面の反りの状態は改善できると考えられるが、平行度の悪化や結晶方位のずれを生じさせていることも考えられる。

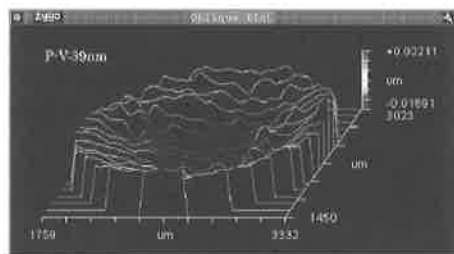
### 3-2-3 電気的特性の検討

本研究で加工を行ったATカット素板のバルク波を用いた水晶振動子としての機能を検討するため、加工後の素板の伝搬特性を評価した。

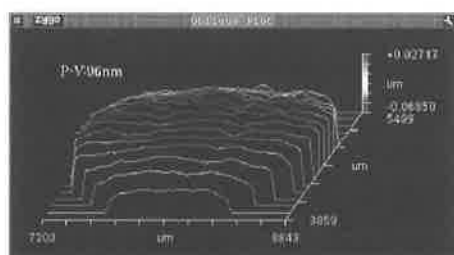
その結果、図17 (a) に示すように加工時間が3時間（除去量として約10μm）では、発振が確認できたが、加工時間が12時間（除去量としては約32.5μm）となると図17 (b) に示すように発振強度は低下し、それ以上の加工を行ったブランクでは、伝搬特性を測定することはできなかった。この原因としては、表面粗さ測定結果と平面度測定結果から明らかなように、非常に平滑な加工面が得られているが、平面度は良好な結果が得られておらず、その結果、



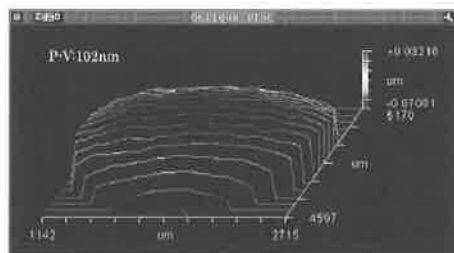
(a) 未処理 (P-V: 56nm)



(b) 2.5Pa (P-V: 39nm)



(c) 7.5Pa (P-V: 96nm)



(d) 13.3Pa (P-V: 102nm)

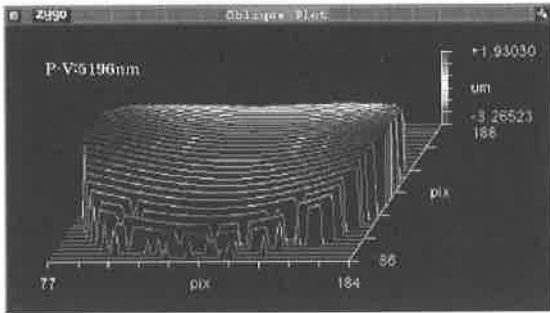
図15 平面度測定結果

表3 加工時間と表面粗さの関係

	(a) 12時間	(b) 21時間
Ra (nm)	1.38	1.26
P-V (nm)	119.6	94.0



(a-1) 外観写真

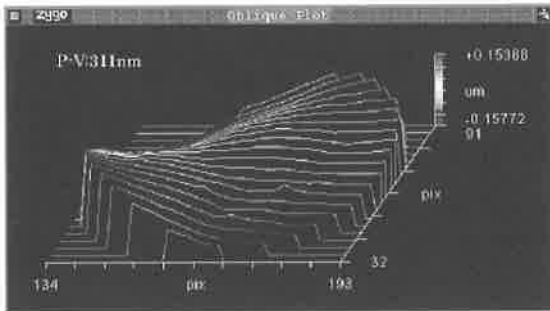


(a-2) 平面度測定結果 (P-V: 5196nm)

(a) 加工時間12時間



(b-1) 外観写真



(b-2) 平面度測定結果 (P-V: 311nm)

(b) 加工時間21時間

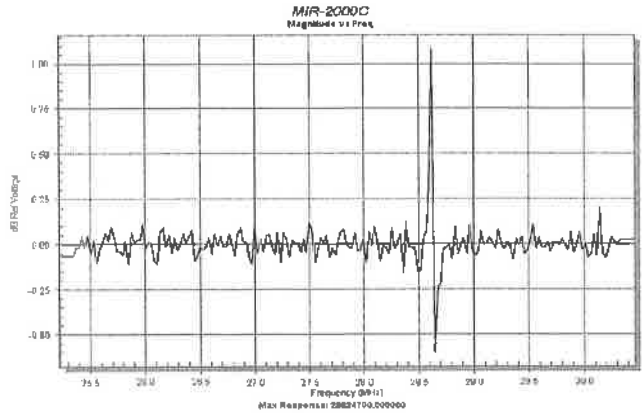
図16 加工後の平面度測定結果

素板自体の平行度のずれや結晶方位のずれが発生した可能性があり、その結果、電気的特性が悪化したと考えられる。

### 3-3 プレード対応型ELID装置による微細加工

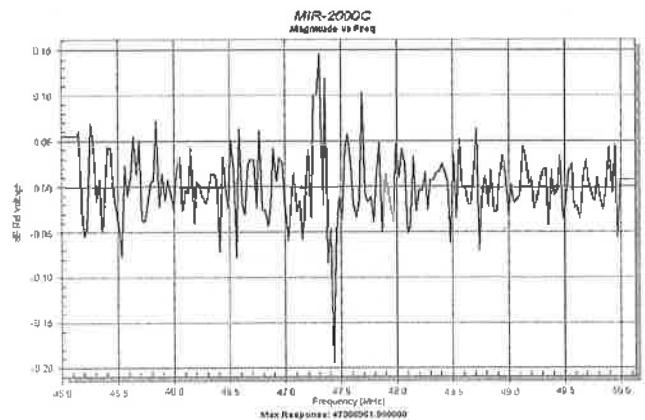
#### 3-3-1 ELID研削技術利用

本研究では、段付き振動子をエッチングにより水晶ウエハー上に多数個形成した後の工程として、それらを個々に分離・切断するための研削加工技術について検討を行った。ここで問題となるのが、レジソンド砥石など一般的



(b) 加工時間12時間

(周波数47.307MHz)



(b) 加工時間12時間

(周波数47.307MHz)

図17 加工後の伝搬特性測定結果例

な砥石を用いた脆性材料の研削加工では、研削面の脆性破壊による損傷が大きだけでなく、除去量の増加とともに急激に研削性能が劣化し加工も非常に困難になる。水晶振動子の切断を目的としている本研究では、振動子チップ内部にまでクラックを発生させるおそれのある脆性モードによる研削は適用できない。

これまで、脆性材料の鏡面研削や延性モード加工について多くの研究がされてきている。それらの研究によると、加工条件にもよるが、おおよそ砥粒径#4000~#8000を用いる加工において脆性モードから延性モードへの遷移することを確認している。また、一般的な脆性材料の延性・脆性遷移値dcは100nm以下と報告されている。

そこで、プレード（薄刃砥石）による高能率、高精度な研削加工実現のため、薄刃砥石での加工にELID研削技術を適用した。これにより、通常では用いることが困難な、#4000,#8000といった微小砥粒径砥石による加工を容易にし、延性モード下の加工で機械的に低損傷且つ面粗度の良好な加工面を、安定的に得ることを目的とした。



### 3-3-2 ブレード対応型ELID装置

図18に、実験機（不二越製SMG20P）用に設計したELID装置を示す。マイクロ加工を行うブレード対応型のこの装置では、これまでのELID装置に比べ、小型電極を用い、電流値も小さく設定した。ブレード径は75mmでブレード厚は0.3mm以下のものを対象としている。電極材料はステンレスで、実験では厚さ0.3mm（ブレード厚と同じ）のものを使用した。クーラントはブレードと電極の間を常に満たすように、上部から流入させるだけの単純なものとした。

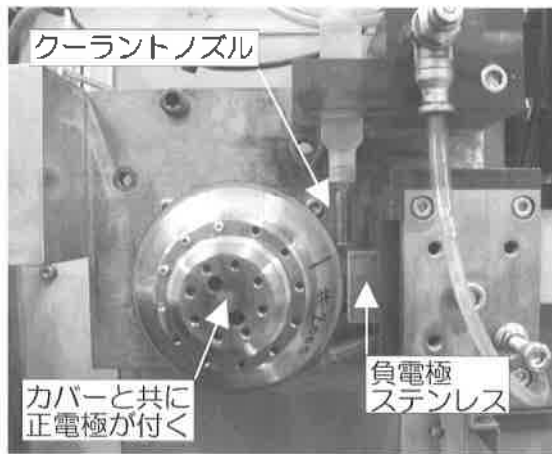


図18 実験機（SMG-20P）用ELID装置

### 3-3-3 水晶ウエハーへのELID研削加工実験

#### 3-3-3-1 初期電解

表4は初期電解条件である。ここで注意が必要となるのは、スピンドル回転数と電流値の関係である。スピンドル回転数の上昇と共に、電流が流れなくなってしまう。これは、スピンドル回転数を上げていくとクーラント中の気泡量が増えてしまうことが原因といわれている。一般的なELID研削加工では、on,off time 1~2 $\mu$ secほどのパルス波で電流を供給しているが、ブレード研削で用いられる20000rpmという高速回転域では、気泡量の増加もあり、パルス波を用いると電流がほとんど流れなくなるため、常に通電状態とした。ブレードと電極間の間隙は、本装置では正確に設定することはできないが、目安として、0.1mmのゲージを用いて調整した。

図19に初期電解における電流値を示した。過去の電解による影響がないように、使用経歴のない#2000、#4000、#8000の三種類のブレードを使った。電流値は最初0.4[A]ほどからはじまり、120秒ほどで0.1[A]以下になり、180秒で約0.05[A]で安定した。電圧値は常に一定の150[V]であった。

表5は、初期電解の前後におけるブレード径をマイクロメーターで測定した結果である。この測定箇所を統一する

ため、測定箇所にマーキングを行った。その結果、電解前後で直径は約30 $\mu$ m増加していることから、およそ15 $\mu$ mの不導体被膜が形成されていることがわかった。

図20は初期電解後の#2000砥石の表面である。赤褐色の酸化鉄の間から無数に光っているのがダイヤモンド砥粒であり、よく突出している様子がわかる。

表4 初期電解条件

電流・電圧値	1 [A], 150 [V]
スピンドル回転数	20000rpm
クーラント	ノリタケクールCEM (50倍に希釈)
砥石	Fuji ダイス 鑄鉄ボンド砥石 SD#20000NIOOM SD#40000NIOOM SD#80000NIOOM
砥石径・砥石厚	$\phi$ 75.0, 0.3

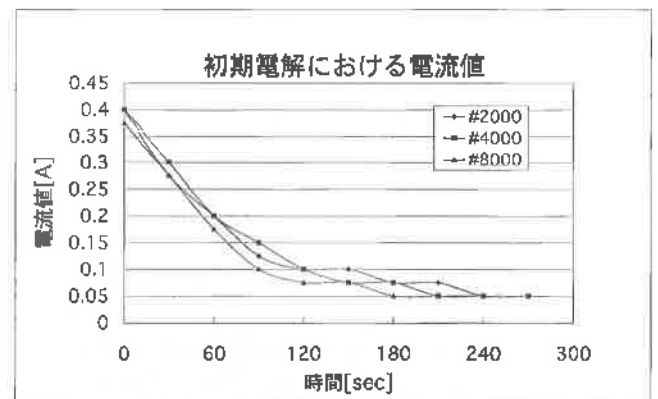


図19 初期電解における電流値

表5 初期電解後のブレード直径

	電解前直径	電解後直径	直径増加分
#2000	75.345	75.373	0.028
#4000	75.576	75.612	0.036
#8000	75.603	75.634	0.031

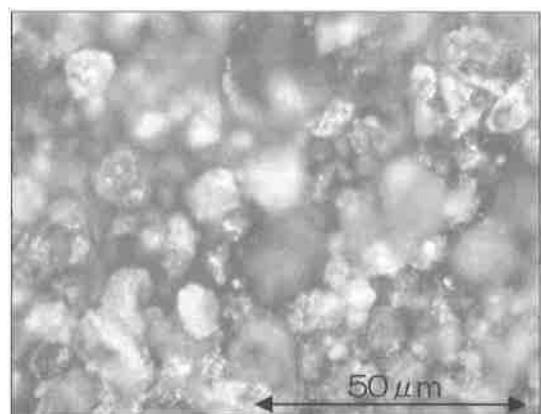


図20 初期電解後の#2000砥石表面

## 3-3-3-2 水晶へのELID研削加工

実際の生産に利用することを目的としているため、加工実験は除去能率を上げることを目標にした。また一方で、製品が水晶振動子として成り立つには、研削による加工面が脆性破壊で占められているものであってはならないことから、機械的に低損傷な加工面が得られる延性モード下の加工が必要である。したがって、除去量を増加させること、及び砥粒一つ当たりの切込量を少なくするためにも、スピンドル回転数は20000rpmとした。主な加工条件を表6に示す。送り速度 $v$ は5mm/min、切込量 $t_a$ は50 $\mu$ mとした。これは#8000砥石を用いて予備実験をおこなった際、 $v=5$ mm/min、 $t_a$ が80~100 $\mu$ m前後で、不導体被膜生成速度が脱落速度に追いつかず、切削抵抗が増加し、加工中に水晶が割れてしまったためである。そのため、加工条件は、インプロセスサイクルが持続でき、かつできるだけ多くの除去量が得られるよう設定した。水晶は両面ポリッシングされているSTカットの水晶ウエハーを使用した。初期電解は先に示した初期電解条件で5分間、また、一般のELID研削などに用いられる放電ツルアーなどによる、ツルーイングは行っていない。そのため、ブレードの真円度、フランジ内径に対する同心度は購入時のままである。加工物との接触 $z$ 座標の設定時にも確認できたが、ブレード研削面は、全周の内ではほぼ一カ所でしか工作物と接触していなかった。しかし、これはELID研削加工による砥石摩擦と共に、真円度、ブレード内径に対する同心度は小さくなっていく。

表6 クリープフィード加工条件

電流・電圧値	1 [A], 150 [V]
スピンドル回転数	20000rpm
クーラント	ノリタケケールCEM (50倍に希釈)
砥石	Fuji ダイス 鋳鉄ボンド砥石 SD#20000N100M SD#40000N100M SD#80000N100M
砥石径・砥石厚	$\phi$ 75.0, 0.3
加工物	ST-cut 水晶ウエハー(両面ポリッシュ)
切込量 $t_a$	50 $\mu$ m
送り速度 $v$	5mm/min

## 3-3-3-3 クリープフィード研削加工

STカット水晶ウエハーにクリープフィードでELID研削加工を行い、研削面を原子間力顕微鏡で観察した。

#2000,#4000,#8000それぞれの加工において、20 $\mu$ m $\times$ 20

$\mu$ mエリアを3視野測定し、その平均面粗さを表7に示す。

表7 クリープフィード研削加工における平均面粗さ

	平均面粗さ Ra [nm]		
	#2000	#4000	#8000
#2000	127.6nm	41.1nm	71.8nm
#4000	49.3nm	52.4nm	36.9nm
#8000	9.2nm	6.7nm	6.9nm

ELID研削加工中、電流値はそれぞれ#2000,#4000,#8000の場合で一定値の0.05[A]であり、これは加工中に不導体皮膜の生成が脱落に追いついていないことを示している。

ここで、#2000,#4000,#8000それぞれを用いた場合の、原子間力顕微鏡 (AFM) による代表的な3Dトポグラフィックを図21~23に示す。

加工面の観察結果から、#2000砥石の場合は図21から、切れ刃条痕も確認できるが、大部分が脆性破壊痕によって占められており、平均面粗さも測定部位によってばらつきが大きい。#4000砥石による研削面は図22で、測定部位によっては脆性破壊が密集している所もあるが、大部分の箇所ではっきりとした切れ刃条痕が確認できた。これらの切れ刃条痕の幅は、大きくとも#4000砥粒の平均砥粒径2~4 $\mu$ m以下で、一つ或いは複数の砥粒が通過して転写されたものであることがわかる。図23の#8000に砥石による研削面では、脆性破壊による損傷がほとんど見られず、ほぼ全面にわたって延性モードの加工面が得られている。測定部位による平均面粗さ値のばらつきも非常に少なく、Ra10nm前後と非常に良好な値を示している。この値は、振動子として使われている水晶素板の表面粗さ (Ra1nm以下) と比べて大きい値であるが、切断面としては十分利用できるものと考えられる。

一般的な研削加工と比較するために、#2000のレジンボンド砥石を用いて同じ加工条件 (20000rpm、送り速度5mm/min、切込量50 $\mu$ m) で加工し、同様に原子間力顕微鏡による観察を行った。その結果、観察3視野 (20 $\mu$ m $\times$ 20 $\mu$ m) で平均面粗さRaがそれぞれ119.7nm, 185.3nm, 173.4nmという値を示した。表7と比較してELID研削を用いたほうが良い値を示している。

次に、電解条件、回転数、送り速度を同一とし、切込量を増加させることによって除去量を多く設定し、不導体被膜の生成、脱落が正常なサイクルを保持できるか検証した。#4000砥石で、購入してから、水晶ウエハーを切込量50 $\mu$ mで約1000mmの距離をELID研削したもの (砥石直径が150 $\mu$ mほど減少) を使用した。ツルーイングは十分できていると考えられる。加工前の初期電解値は0.05[A]で安

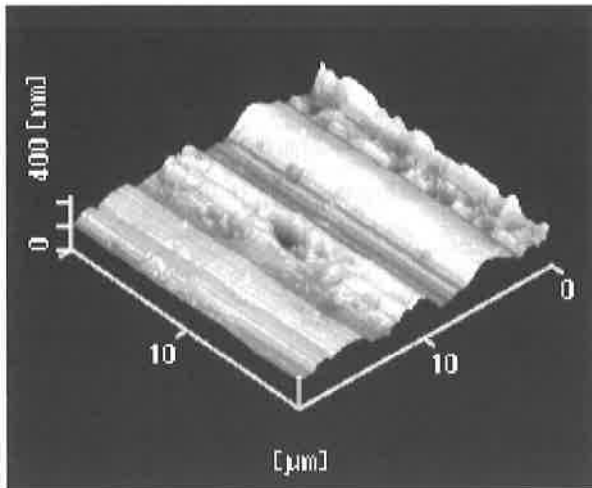


図21 #2000 砥石を用いた研削面

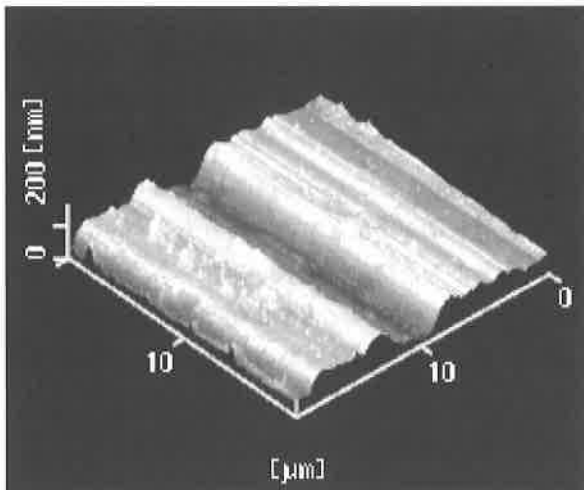


図22 #4000 砥石を用いた研削面

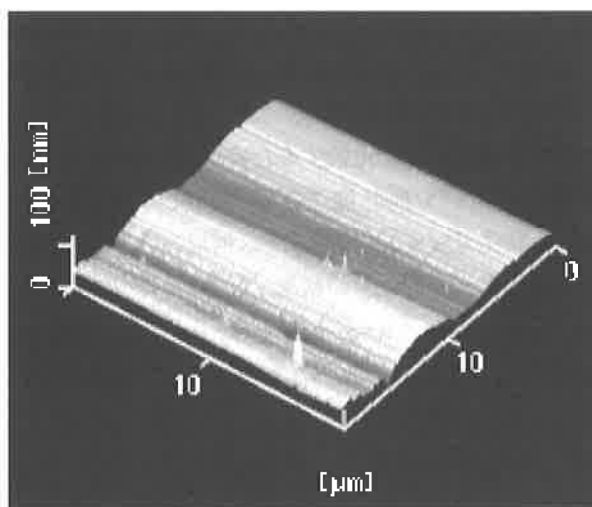


図23 #8000 砥石を用いた研削面

定した。また、それぞれの切込量における研削面を原子間力顕微鏡により任意に3視野(20 $\mu$ m $\times$ 20 $\mu$ m)測定し平均面粗さを求めた。

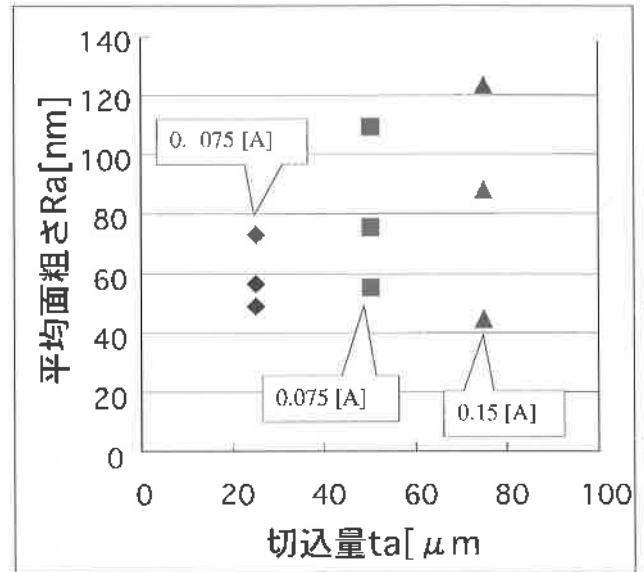


図24 切込量の増加と平均面粗さ及び電流値

図24に除去量を増加させたとき(切込量 $t_a=25,50,75\mu$ m)の平均面粗さ $R_a$ と加工中の電流値を示す。

除去量の増加と共に、平均面粗さ値は大きくなり、測定部位によりその値に大きな差がある。これは脆性破壊による損傷箇所が、除去量の増加と共に増えていることを示している。このときの電流値は、25,50 $\mu$ mの切込量で、0.075[A]であった。これは初期電解で約15 $\mu$ mの不導体被膜ができ、安定したときの値0.05[A]と同程度であり、不導体被膜の生成が脱落に追いついていないと考えられる。切込量が75 $\mu$ mのときには、0.1~0.15[A]の間で不安定な数値を示していた。除去量の増加に伴い、不導体被膜生成と脱落が正常なサイクルを保てなくなってきているのが確認できる。切込量100 $\mu$ mの場合においても同様に加工実験を行ったが、電流値は0.4[A]となり、初期電解前の値と同程度であり、研削面は鋳鉄ボンドとの摩擦で発生したと思われる焼けで黒色に変色し、著しい脆性損傷で溝部分にチッピングが起こっているだけではなく、水晶ウエハー全体にまでおよぶクラック(ヒビ)が発生していた。

図25は図23を真上から見たときのものである。砥石の進行方向に対して約15 $\mu$ mの間隔で2つの断面W1-W1, W2-W2をとり、その断面のプロファイルを図26に示した。送り速度は回転あたり250nmに設定しているので、この研削距離において砥石は60回転していることになる。図26の結果から、2つのプロファイル断面がほぼ一致しており、このことから、本実験の電解条件及び加工条件では、15 $\mu$ mほどの研削距離において、不導体被膜の脱落がほとんどないことを確認できる。平均砥粒径が1 $\mu$ m前後の#8000砥石による加工であることを考慮すると、図26中のA~Jの谷は、一つの粗さ有効切れ刃の通過によって転写されたも

のだと考えられる。B-C間に幅  $1\ \mu\text{m}$  深さ  $25\text{nm}$  ほどの谷があるが、これもよく突出した1つ以上の砥粒が深く切り込んでできたものだと考えられる。W2-W2断面図上で、W1-W1ではなかった新たな谷Kが存在している。砥粒の脱落があっても、酸化被膜が新たな砥粒の突出を助けているのがわかる。A-J以外の場所では、谷形状の切削痕は見られないが、加工面が延性であることから、複数の有効切れ刃の通過によってプロファイル形状が作られたと推測できる。このことはインプロセスドレッシングにより砥粒がよく突出していることを示している。

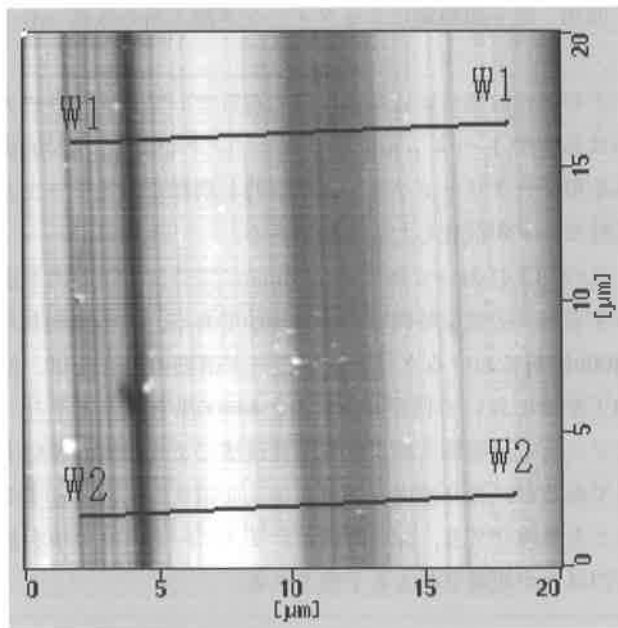


図25 #8000 砥石による研削面

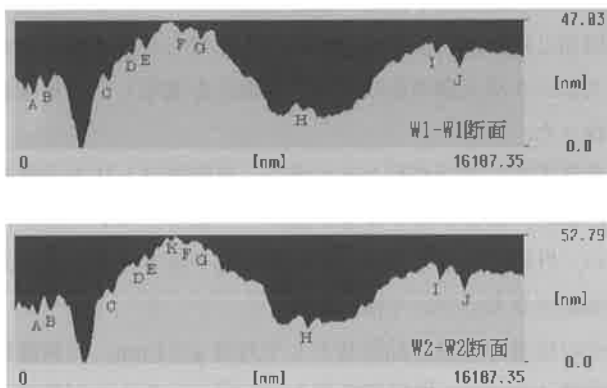


図26 #8000 砥石による研削面の断面図

### 3-3-3 4 ハイスピードストローク研削加工

これまで、ELID研削の主用途が平面研削などの分野で、浅い切込量、速い送り速度の加工形態で、脆性材料などの鏡面創成などに利用されてきた。ウエハー上に形成した振

動子の切断を主な目的としているこの研究では、ブレードによるクリープフィード研削だけでなく、ハイスピードストローク研削で複数回切り込む方法を検討した。

電流、電圧値はクリープフィード研削の場合と同じに設定し、あらかじめ水晶を加工物としてELID研削加工を行い、ツルニングの済んでいる#4000砥石（切込量  $50\ \mu\text{m}$  で約  $1000\text{mm}$  の距離を研削し、砥石直径が  $150\ \mu\text{m}$  ほど減少したもの）を使用した。表8に加工条件を示す。また  $10000\text{rpm}$ 、 $20000\text{rpm}$  それぞれの回転数において、送り速度を  $2000$ 、 $3500$ 、 $5000\text{mm/min}$  の3種類、切込量を  $0.5$ 、 $1$ 、 $2$ 、 $3\ \mu\text{m}$  の4種類の値に変化させたときの、電流値を図27に示した。

表8 ハイスピードストローク加工条件

電流・電圧値	I [A]、150 [V]
スピンドル回転数	20000rpm 10000rpm
クーラント	ノリタケクールCEM (50倍に希釈)
砥石	Fuji ダイス 鑄鉄ボンド砥石 SD#40000N100M
砥石径・砥石厚	$\phi 75.0$ 、 $0.3$
加工物	ST-cut 水晶ウエハー (両面ポリッシュ)
切込量 $t_a$	$0.1$ 、 $1$ 、 $2$ 、 $3\ \mu\text{m}$
送り速度 $v$	$2000$ 、 $3500$ 、 $5000\text{mm/min}$

電流値が加工中を通して常に一定の値を示していたのは、加工条件が回転数  $20000\text{rpm}$  で切込量  $0.5\ \mu\text{m}$ 、送り速度  $2000\text{mm/min}$  の場合で、 $0.15[\text{A}]$  であった。図27中で  $0.2[\text{A}]$  以下の値が他にも4点あるが、これらは加工中安定した一定の値ではなく、水晶ウエハーとの接触中は不導体被膜が脱落するため電流値は増加し、非接触中には導体被膜が生成されるため電流値が減少する、といった挙動を繰り返していた。その中の最大電流値をプロットしてある。これは、除去量が多すぎるために不導体被膜の生成が脱落に追いついていないことを現している。そのため加工はインターバルドレッシング加工となってしまっている。それ以外の加工条件での電流値は、 $0.3\sim 0.4[\text{A}]$  であり、これは不導体被膜を完全に失ったときの電流値である。研削面も焼けによって黒っぽく変色し、脆性破壊による損傷も激しい。図27中で唯一、正常なインプロセスサイクルを保っていたと思われる条件（回転数  $20000\text{rpm}$ 、切込量  $0.5\ \mu\text{m}$ 、送り速度  $2000\text{mm/min}$ ）を用いて実際に、一辺が  $400\ \mu\text{m}$  の正方形に  $50\ \mu\text{m}$  深さの溝で加工を行った。図28、29にこのときの研削面の電子顕微鏡写真を示す。

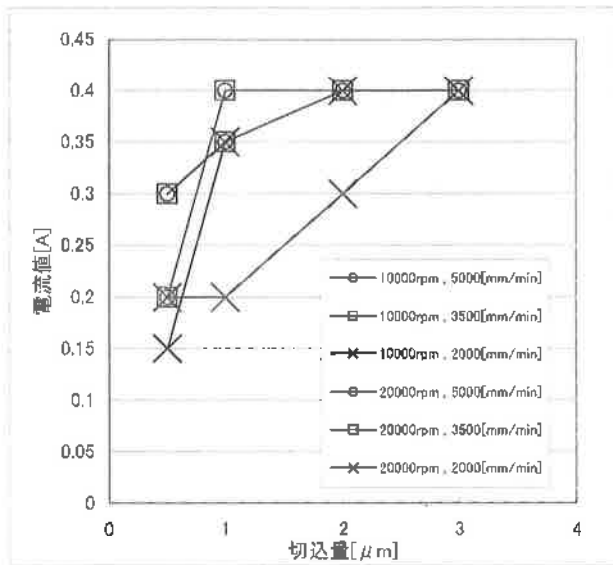


図27 ハイスピードストローク加工条件と電流値

大きなチップング等の脆性破壊痕もこのスケールではほとんど認められない。また、図30は研削面のみを拡大した写真である。これを見ると研削条痕も確認できるが、ほと

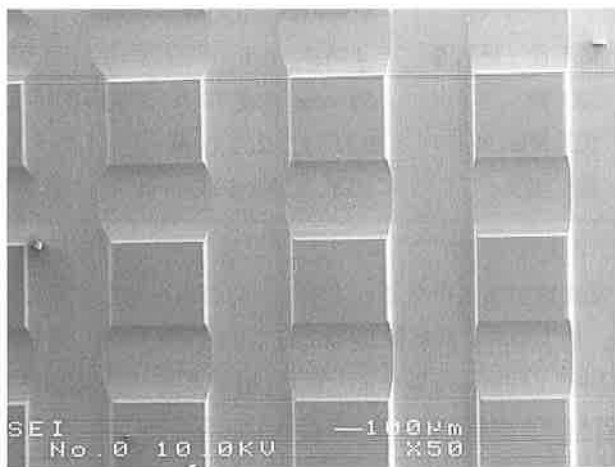


図28 電子顕微鏡によるダイヤモンド加工面の写真 (1)

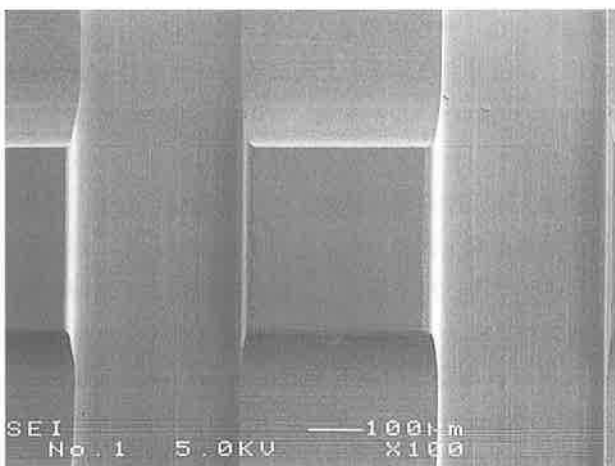


図29 電子顕微鏡によるダイヤモンド加工面の写真 (2)

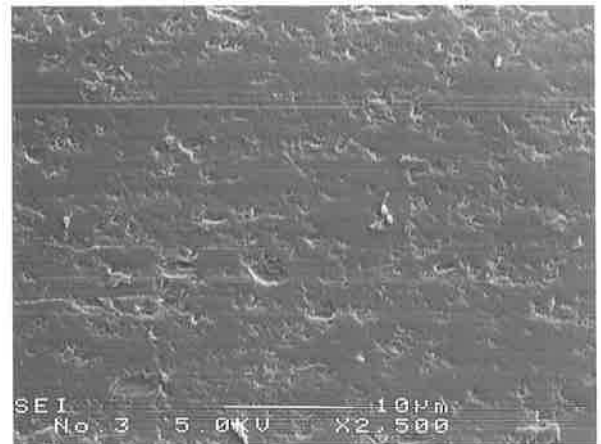


図30 電子顕微鏡によるダイヤモンド加工面の写真 (3)

んどが脆性破壊による損傷で占められていて、大きさの大小はあるが1～4 μmほどのチップングが多く、#2000砥石を用いたクリープフィード研削時と同様の脆性モードと延性モードが混在した加工面である。

この加工において加工距離75mmに深さ50 μmの溝を加工するのに必要な時間は約4分30秒である。先に実験した#4000砥石におけるクリープフィード研削の場合では、同加工距離において15分であった。#4000砥石によるクリープフィード研削加工面よりも脆性破壊による損傷が多いようであるが、送り速度を下げても加工面精度を同程度とすることを考慮しても、加工時間はハイスピードストローク加工のほうが短縮されると予想される。

## 5. 結言

### 5-1 構造解析による形状設計

高周波水晶振動子開発の設計段階において、板厚寸法や外周部と内部薄膜部との段差の寸法に対して表面積が非常に大きい3次元薄肉形状に有限要素法を適用し、形状設計を行った。

水晶素板を曲げ変形させた場合、薄膜部分へ圧力が加わった場合、および落下衝撃が加わった場合について解析を行い、外周部の厚さ寸法や内側薄膜部の厚さ寸法、内側薄膜部直径などについて検討した。

その結果から試作品形状として外径φ5.1mm、内側薄膜部直径φ3mm、外周部の厚さ60～70 μmの寸法が最適であることが導かれた。また、内側薄膜部の厚さが5 μm以下になると著しく強度が低下する傾向が見られたため、製造における加工時や作業時に注意が必要であることが判った。

### 5-2 ドライエッチング加工

水晶素板に対し、エッチングマスクにWSi (タンゲステ

ンシリサイド), 反応ガスに $\text{CHF}_3$ を用い, 処理圧力を変化させてドライエッチング加工を行い, 以下のような結果が得られた.

エッチング速度は, 処理圧力 $7.5\text{Pa}$ で約 $46\text{nm}/\text{min}$ であり, STカット素板, ATカット素板のいずれの場合もほぼ同様のエッチング速度であった. また加工部の断面形状は, ほぼ垂直断面の異方性エッチングの形態であった.

また加工面の表面粗さを光学式表面粗さ測定器で測定した結果, 平均粗さ $\text{Ra}1\text{nm}$ 以下のポリッシュ面と同等の加工面が得られた. また処理圧力が高くなると, 表面粗さは悪化する傾向を示した.

一方, 水晶素板は, WSiマスクの内部応力に起因すると考えられる歪みにより変形するため, 平面度は悪化することが明らかとなった. またこのことは, 水晶振動子として機能させる場合, 素板の表面と裏面との平行度の低下や結晶方位のずれを生じさせる原因となり, 機能を発揮させる上で, 解決する必要がある.

### 5-3 ブレードによるELID研削加工

マイクロジェネレータSMG-20P(不二越)に付設するELID装置を製作し, ブレードによる水晶へのELID研削加工を行った. 加工中も安定して不導体被膜を持たせることができた.

#4000砥石では, 平均面粗さが $\text{Ra}0.1\mu\text{m}$ 以下の加工面を1パスのクリープフィード研削で得ることができた. 研削面には脆性破壊による損傷と延性モードによる加工面が混在している.

#8000砥石を用いた加工では, ほぼ全面にわたって脆性破壊による損傷のない延性モードの加工面を得ることができた. 平均面粗さは $\text{Ra}10\text{nm}$ 前後であった.

水晶ウエハー上に形成した振動子を個々に切断する工程で, 機械的に低損傷な加工面を安定的に得る方法として利用できる.

本研究は, 平成12年度地域新生コンソーシアム研究開発事業によって行われたものであり, 共同研究機関各位及びELID研削についてご指導くださった理化学研究所素形材工学研究室主任研究員大森整氏に感謝いたします.

### 参考文献

- 1) 岡野庄太郎 著: 水晶周波数制御デバイス, 株式会社テクノ,p5-36
- 2) 国立天文台編: 理科年表, 丸善株式会社
- 3) 滝貞夫, 吉村順一, 野中一男: 山梨大学工学部研究報告第34号, P123 (1983)
- 4) 宮下政和: ぜい性材料の延性モード研削, 精密工学会誌, 56 5

(1990) 782

- 5) 市田良夫ほか: ファインセラミックスの鏡面研削に関する研究, 精密工学会誌, 57, 8 (1991) 1406
- 6) 安井平司ほか: 粗粒ダイヤモンド砥粒によるファインセラミックスの延性モード高平滑研削, 精密工学会誌, 63, 9 (1997) 1270
- 7) 大森整: ELID研削加工技術, 工業調査会,p167-200
- 8) 小松利安ほか: 精密微細加工技術の開発-ELID研削方による微細加工-, 山梨県工業技術センター研究報告 (1997)