

平成23年度第3次補正予算 戦略的基盤技術高度化支援事業

「大口径サファイアウェーハの高精度切削加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年12月

委託者 経済産業省 近畿経済産業局

委託先 株式会社タカトリ

# 目次

目次 .....	1
<b>第1章 研究開発の概要</b> .....	4
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 .....	4
1-2 研究体制 .....	6
1-3 成果概要 .....	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口 .....	13
<b>第2章 本論</b> .....	14
2-1 想定される面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化...	14
2-1-1 従来の加工条件による切断精度の検証 (3インチサファイア) .....	16
1) 揺動角度の違いによる反り比較 .....	16
2) 揺動速度の違いによる比較 .....	16
3) 張力の違いによる比較 .....	16
4) 線速の違いによる比較 .....	17
5) 加工液吐出量の違いによる比較 .....	17
6) 加工液温度の違いによる比較 .....	17
2-1-2 高線速かつ高張力走行による切断精度の検証 .....	18
1) 3インチインゴットでの検証 .....	18
1-1) 加工液温度の違いによる比較 .....	18
1-2) サイクル数の違いによる比較 .....	18
1-3) 加工時間の違いによる比較 .....	18
1-4) 揺動角度の違いによる反りの比較 .....	19

2) 4 インチインゴットでの検証 .....	19
2-1) 新線供給量の違いによる比較 .....	19
2-2) 加工速度パターンの違いによる比較 .....	19
3) 6 インチインゴットでの検証 .....	20
3-1) 揺動速度の違いによる比較 .....	20
4) 8 インチインゴットでの検証 .....	20
<b>2-2 想定外の面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化.....</b>	<b>21</b>
<b>2-2-1 試作機での検証 .....</b>	<b>21</b>
1) 装置の違いと加工条件の関係 .....	21
1-1) 装置の違いと加工条件の関係① .....	21
1-2) 装置の違いと加工条件の関係② .....	22
2) 揺動動作と加工精度の関係 .....	22
3) 試作機による加工技術の最適化 .....	22
<b>2-3 マルチワイヤーソーの試作開発 .....</b>	<b>23</b>
<b>2-3-1 試作機 .....</b>	<b>23</b>
1) MWS-68 の特徴 .....	23
2) MWS-612DR の特徴 .....	24
3) MWS-612DN の特徴 .....	24
<b>2-3-2 揺動動作プログラム .....</b>	<b>25</b>
1) 従来の揺動.....	25
2) Sin カーブ揺動 .....	25
3) 揺動加減速 .....	25
<b>2-3-3 試作機の性能評価 .....</b>	<b>26</b>
1) 振動に関する評価 .....	26
2) 騒音に関する評価 .....	26

2-4 最適切削工具及び加工条件の確立 .....	27
2-4-1 ワイヤソーにおける切断抵抗の研究 .....	27
1) 概要 .....	27
2) 実験 .....	29
3) まとめ .....	32
2-4-2 ワイヤ断線のメカニズム .....	33
1) 断線原因の抽出 .....	33
2) 実験方法 .....	33
3) 実験結果 .....	34
4) まとめ .....	34
2-4-3 サファイアの加工特性の解析 .....	35
1) 概要 .....	35
2) 実験方法 .....	35
2-1) 切削速度の影響 .....	36
2-2) 切り込みの影響 .....	36
3) まとめ .....	38
第3章 全体総括 .....	39
3-1 研究開発の成果 .....	39
3-2 今後の課題 .....	40
3-3 事業化の展開 .....	40

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

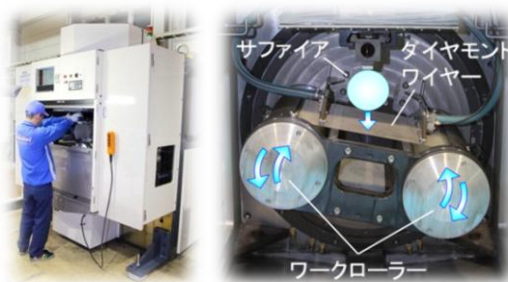
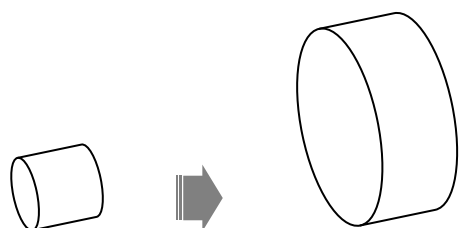
### 1-1-1 研究開発の背景

LEDは低消費電力であることから、LED照明、液晶パネルのバックライトなどに用途が広がっており、生産性向上・コストダウンのニーズが高まっている。そうしたニーズに対応するため、LEDの基板となるサファイアウェーハの大口径化が進められている。ウェーハの大口径化により、生産性が向上し、大幅なコストダウンが可能となる。現在、市場でのウェーハサイズは3~4インチが主流であるが、より大きな6~8インチに向けた、技術開発競争が激しさを増している。

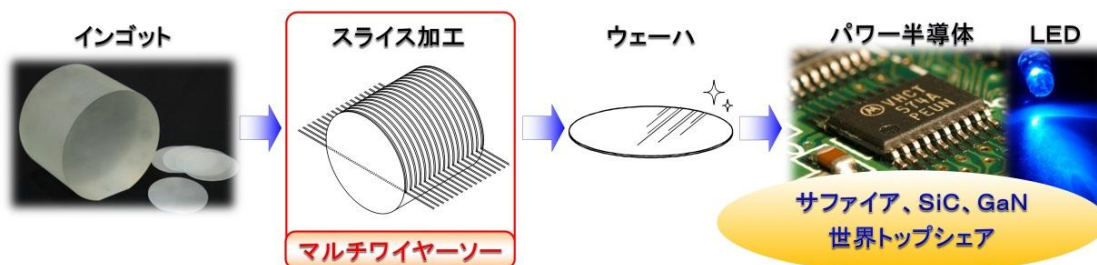
【図1】サファイアインゴットの大口径化

【図2】マルチワイヤーソー

現在は3~4インチ 将来は6~8インチへ

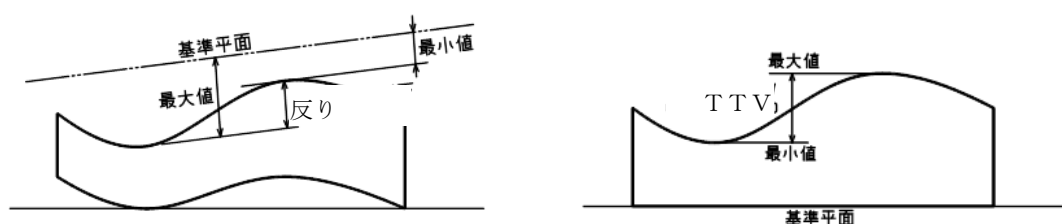


【図3】LEDの製造工程(前工程)



大口径化を進める上で、切削加工技術の高度化が求められている。現在、マルチワイヤーソーでサファイアウェーハを加工する際の厚みは1mm前後であるが、その歩留りは、シリコンウェーハの加工厚み(0.2mm以下)と比較すると格段に悪い。サファイアが高価な材料であるにもかかわらず、厚く加工しなければならない理由は、サファイアが難加工材料であるため、加工時に大きな反りやTTV(厚みバラつき)が出てしまい、後工程で研削しなければならないからである。反りやTTVは、大口径化するとさらに悪化し、材料ロスが増すことから、大口径化に向けたネックとなっている。

【図4】サファイアウェーハの反りとTTV



当研究により、切削加工技術を高度化することで、大口径化が進み、LEDの生産性向上・コストダウンが進めば、LED照明の普及や更なる用途拡大に繋がり、省エネや低炭素社会の実現に大きく貢献することができる。

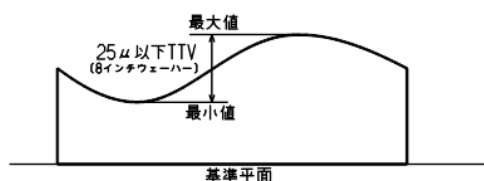
### 1-1-2 研究開発の目的及び目標

サファイアウェーハの大口径化によって悪化する反りや、TTVの少ない切削加工技術の高度化を目指す。具体的な目標として、以下の全体目標を達成する。

【図5】研究開発の全体目標

	従来(6インチ)	従来(8インチ)	目標(8インチ)
反り	150 $\mu$ m	200 $\mu$ m	100 $\mu$ m 以下
TTV	30 $\mu$ m	40 $\mu$ m 以下	25 $\mu$ m 以下
厚み	0.8~1.5 mm	0.8~1.5 mm	0.8 mm 以下

【図6】反りの全体目標



【図7】TTVの全体目標



当事業では、まず既存のマルチワイヤーソーを用いてテストカットを行い、反りとTTVを悪化させる原因を特定、解析を行う。それぞれの原因に対応した加工技術開発を行い、それをベースとした試作機開発を行う。試作機を用いたテストカットにより、さらなる原因の潰し込みを行い、もって当事業の目標達成を図る。研究開発にあたり、以下のサブテーマを設定し、これを推進する。

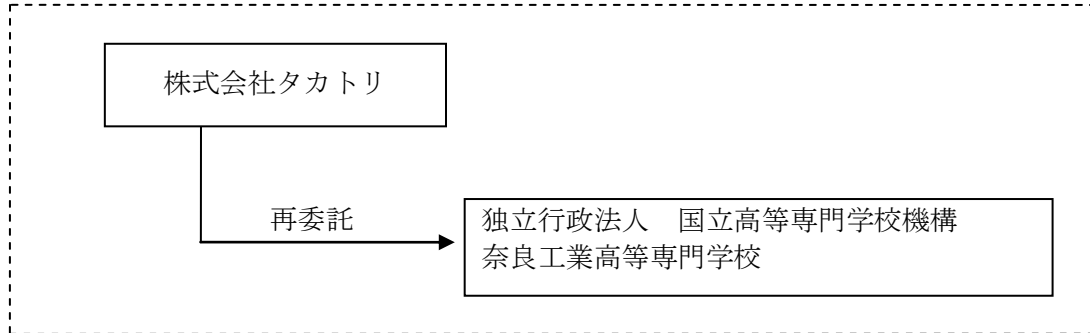
- 【1】想定される面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化
- 【2】想定外の面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化
- 【3】マルチワイヤーソーの試作開発
- 【4】最適切削工具及び加工条件の確立
- 【5】プロジェクトの管理・運営

【図7】8インチサファイア切削加工風景



1-2 研究体制

1-2-1 研究組織

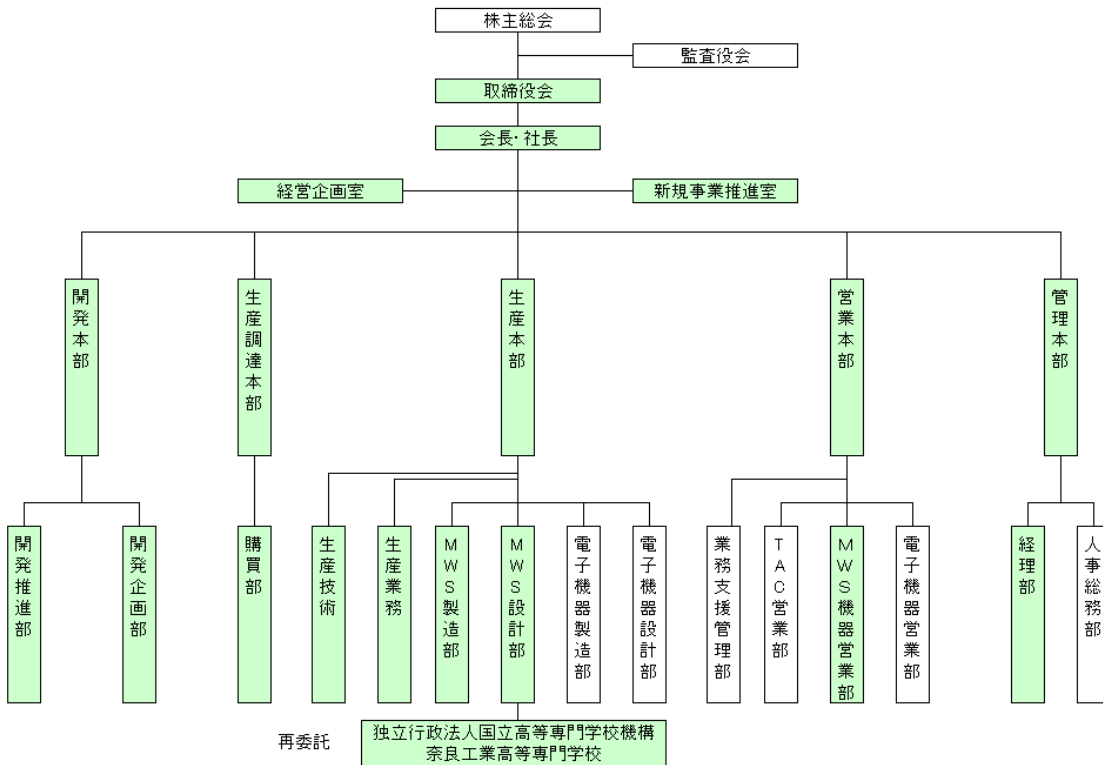


総括研究代表者（PL）  
 所属：株式会社タカトリ  
 生産本部MWS設計部  
 役職：部長  
 氏名：北博之

副総括研究代表者（SL）  
 所属：独立行政法人  
 国立高等専門学校機構  
 奈良工業高等専門学校  
 役職：機械工学科教授  
 技術支援室 室長  
 氏名：和田 任弘

1-2-2 管理体制

① 事業管理機関：株式会社タカトリ



②再委託先：独立行政法人国立高等専門学校機構奈良工業高等専門学校



### 1-2-3 管理員及び研究者

① 事業管理機関：株式会社タカトリ

《管理員》

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
福光 秀之	経営企画室 室長	【5】プロジェクトの管理運営
福井 久容	経営企画室	【5】プロジェクトの管理運営

《研究員》

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
北 博之	生産本部 MWS 設計部 部長	【1】想定される面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化
森田 昌宏	生産本部 MWS 設計部 課長	
松田 祥伍	生産本部 MWS 設計部 主任	【2】想定外の面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化
原田 和哉	生産本部 MWS 設計部	
米田 竜也	生産本部 MWS 設計部 課長	【3】マルチワイヤーソーの試作開発
森岡 晃一	生産本部 MWS 設計部 係長	
武田 篤徳	生産本部 MWS 設計部	【4】最適工具及び加工条件の確立
植松 豊	生産本部 MWS 製造部 次長	
和田 修一	生産本部 MWS 製造部 主任	
田中 基裕	生産本部 MWS 製造部	
今井 孝則	開発本部 本部長	
植村 奈保樹	開発本部 開発推進部	

② 再委託先【独立行政法人国立高等専門学校機構奈良工業高等専門学校】

氏名	所属・役職	実施内容
和田 任弘	機械工学科教授 技術支援室 室長	【1】想定される面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化 【2】想定外の面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化

### 1-2-4 協力者

《アドバイザー》

氏名	所属・役職	実施内容
加藤 智久	先進パワーエレクトロニクス研究センター ウェハプロセスチーム 主任研究員 工学博士	【5】スライス加工技術高度化委員会



### 1-3 成果概要

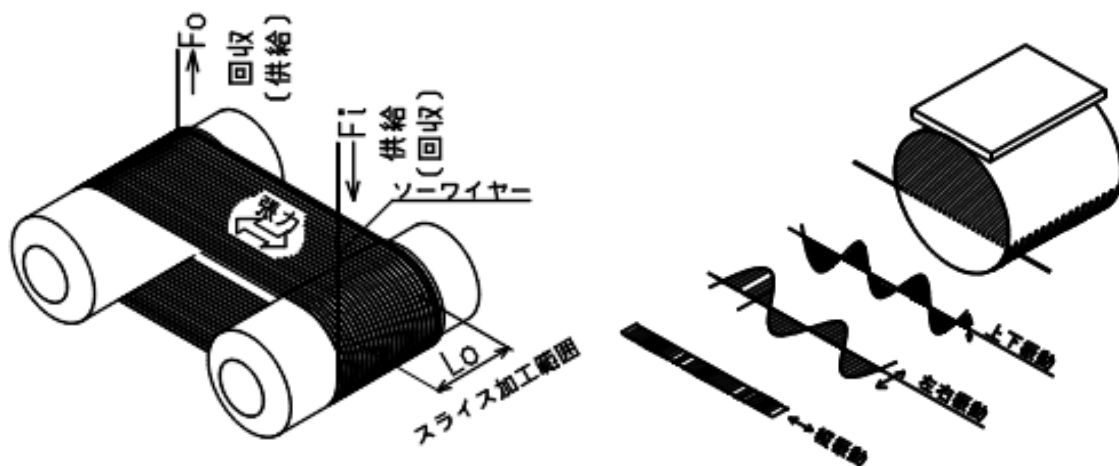
### 1-3 成果概要

研究実施内容に示した各研究項目に沿って成果概要を記載する。

#### 【1】想定される面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化

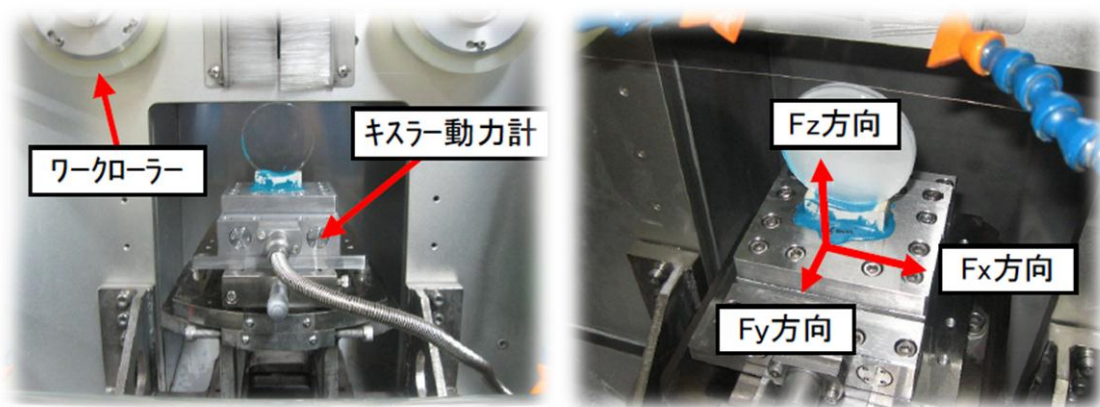
既存のマルチワイヤーソーを用いて、さまざまな加工条件(ワイヤー線速、張力、揺動角度等)でテストカットを行い、ウェーハ面精度(反りとTTV)の測定と解析を行った。

#### 【図8】 面精度に影響を与える要因事例 (ワイヤー張力と振動)



ワイヤーの挙動を直接測定することが困難であることから、テストカット中にキスラー社製の動力計を用いて、ワークを保持するテーブルに掛かる負荷の測定を行い、切削加工中にワイヤーがウェーハに与える不可を解析するためのデータを蓄積することができた。

#### 【図9】 R&D用ワイヤーソーに取り付けたキスラー社製動力計



得られたデータの解析により、加工条件とウェーハ面精度の関係を明確にすることができた。また、影響の大きな加工条件の組み合わせを工夫することで、面精度が大きく改善されることがわかった。

既存機によるテストカットを実施する中で、加工条件の一つであるワイヤー供給量が面精度に大きく影響することがわかった。

こうして得られた知見から最適な加工条件を設定し、既存機を用いて、6 インチサファイアのテストカットを行った結果、ウェーハ面精度を大幅に改善することに成功した。特に反りについては、従来の半分以下に抑制することができた。

これらの加工条件とウェーハ面精度に関する基礎研究を、論文「円弧揺動ワイヤーソー加工にダイヤモンドを用いた場合の基礎研究」として、金沢大学で開催された「2011 年度 砥粒加工学会(平成 23 年 9 月 7 日)」にて発表した。

以下に、【1】で検証した内容の中で反りに関して得られた知見を示す。

- ① 加工液温度による反りへの影響は少ない。
- ② サイクル数による反りへの影響は少ない。
- ③ 加工時間に関しては最適な加工速度であることがわかった。
- ④ 3° と 5° では反りへの影響は少ない。
- ⑤ 新線供給量の反りへの影響は少ない。
- ⑥ 加工速度パターンは反りに影響を及ぼす。
- ⑦ 加工時間は反りに影響を及ぼす。
- ⑧ 揺動速度が反りに影響を及ぼす。

## 【2】想定外の面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化

MWS-612DD と呼ばれる従来機をベースとして改良した MWS-612DR、そして次世代機として MWS-612DN を開発した。このことから、装置の形状や剛性の効果に対する評価も含めて試作機での加工テストを実施した。

以下に、【2】で検証した内容の中で反りに関して得られた知見を示す。

- ① 従来装置よりも加工精度の良化がみられた。
- ② 新しく作成した揺動動作での切断結果が良化する傾向がみられた。
- ③ 6 インチで反りを 50um 以下にする切断結果を得た。
- ④ 6 インチで従来の加工時間(24h)を半分の時間で加工できるようになった。

【1】【2】の面精度に影響を与える発生要因の解析によって得られた加工条件の最適化により、従来の 6 インチサファイアウェーハ加工における改善された面精度を【図 10】に示す。

【図 10】 6 インチサファイアウェーハ切削加工の面精度

	従来の精度	研究後の精度	研究成果
反り	150 $\mu$ m	50 $\mu$ m	100 $\mu$ m 向上
T T V	30 $\mu$ m	15 $\mu$ m	15 $\mu$ m 向上
厚み	0.8~1.5 mm	約 0.8 mm	—

【3】マルチワイヤーソーの試作開発

当初計画では、装置 1 台の試作機開発を予定していたが、当研究成果の事業化計画の早期実現のために、装置 2 台の試作機開発を行うこととし、開発モデル名をそれぞれ「DR」「DN」とした。 ※ 試作機の製造コストは、タカトリが負担。

「DR」は、既存機 MWS-612DD のマイナーチェンジ機という位置付けで、基本設計の大部分を共有し、研究成果の中でも技術的ハードルの低い課題の解決を目指した。

早期の試作機開発が可能であり、DRを用いたテストカットにより、これまでの研究成果の検証と今後の研究開発の方向性を明確にすることができた。

「DN」は、既存機のフルモデルチェンジ機という位置付けで、基本構造から設計を見直し、特許申請中の新機構を採用した。

【図 11】 試作機① MWS-612DR



線速 : 1000m/min  
 張力 : 45N  
 タンク : 200L(1体型2槽タンク)  
 スピンドル : 強化スピンドル  
 微調テーブル : 強化テーブル

【図 12】 試作機② MWS-612DN



線速 : 1200m/min  
 張力 : 45N  
 タンク : 200L(1体型2槽タンク)  
 スピンドル : 強化スピンドル  
 微調テーブル : 強化テーブル

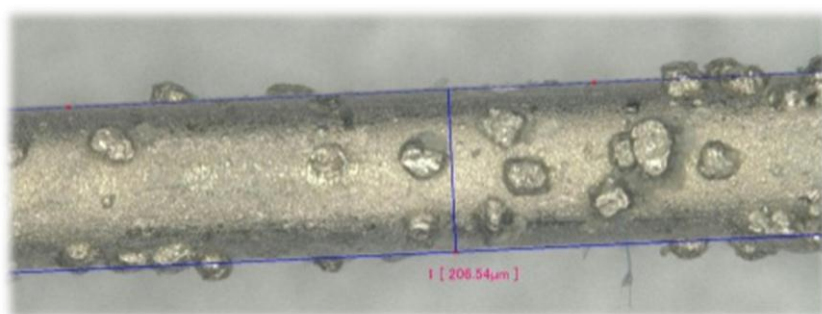
#### 【4】最適切削工具及び加工条件の確立

##### 【4-1】最適切削工具の検証

サファイアの切削加工で使用される工具は、ダイヤモンドワイヤーとなるが、その品質は加工コストや精度に大きく影響する。

当研究では、市販の主要3社のダイヤモンドワイヤーを自作した「自動振れ試験機」で断線させ、断面をマイクロスコープで観察し、比較検証した。

【図13】ダイヤモンドワイヤー



【図14】マイクロスコープと自動振れ試験機



また、マルチワイヤーソーが一度に切断するサファイアは大変高価であり、断線は、顧客にとって大損害となることから、重要な技術課題であるが、未だ防ぎきれていない。断線の原因は、切削抵抗の変化や、ワイヤーの傷が想定されるが、そのメカニズムは解明できていない。

そこで、奈良県工業技術センターに委託し、ワイヤーの引張試験を通じて、ワイヤー断線メカニズムの解明を試みた。※ 委託費は、タカトリが負担。

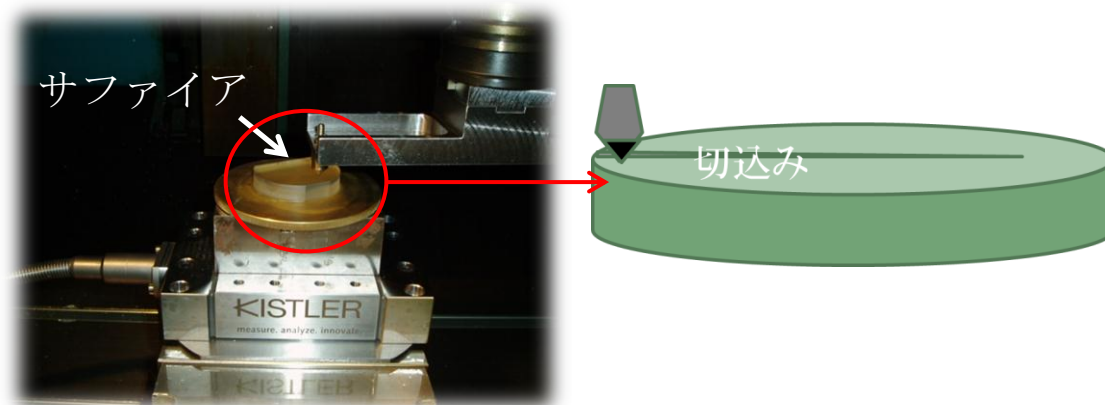
ダイヤモンドワイヤーの破断面は、振じ切れた場合と、引き切れた場合、傷が元で切れた場合で明らかに異なり、破断面の観察によって断線の原因を特定できる可能性を示す知見が得られた。

今後は、さらに想定される断線の原因をモデル化し、破断面の観察を続けると同時に、テストカット中に発生した断線の破断面の観察も行い、断線モデルの再現性の検証を行う。

#### 【4-2】最適加工条件の検証

一般的に延性モード加工が可能な延性材料よりも、脆性材料は加工面の面精度が出にくい材料である。サファイアのような高硬度な脆性材料は、延性モード加工ができないと考えられていたが、ダイヤモンドツールを用いてサファイアに傷をつけ、観察する研究を行った結果、切り込み量を小さくすることで、サファイアの延性モード加工ができる可能性があることがわかった。

【図 15】 サファイアに傷をつける様子



以下に、【4-2】で検証した内容の中で得られた知見を示す。

- ① 線速を高速にすることによって、砥粒 1 個当たりの切込みが小さくなるので、降下速度を大きくすることができ、切断時間を短縮することが可能である。
- ② 線速を高速にすることによって、脆性モード切削から、延性モード切削へ移行し、良好な仕上げ面を得ることができる可能性がある。

以上、【1】～【4】の研究成果により、8 インチサファイアウェーハ加工における改善された面精度が、【図 10】に示す通り、当事業の目標を達成することができた。

【図 16】 8 インチサファイアウェーハ切削加工の面精度

	従来の精度	目標	研究後の精度	成果(従来比)
反り	200 $\mu$ m	100 $\mu$ m 以下	60 $\mu$ m	140 $\mu$ m 向上
TTV	40 $\mu$ m	25 $\mu$ m 以下	15 $\mu$ m	25 $\mu$ m 向上
厚み	0.8～1.5 mm	0.8mm 以下	0.8 mm	—

## 【5】プロジェクトの管理・運営

当研究開発のために導入した、ウェーハ検査装置、レーザーマイクロスコープ等の計測機器を設置するための精密検査室及びマルチワイヤソー専用の研究施設を、既存工場の一部を改装し整備した。(平成 23 年 3 月完成) ※ 改装費は、タカトリが負担。

【図 17】 マルチワイヤソー専用研究施設 「スライシングラボ」と「精密検査室」



当事業を円滑に推進するため「スライス加工技術高度化委員会」を下記の通り実施した。

- 第 1 回 平成 22 年 12 月 7 日開催
- 第 2 回 平成 23 年 11 月 25 日開催
- 第 3 回 平成 24 年 11 月 28 日開催

【図 18】 第 1 回スライス加工技術高度化委員会の様子



### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社タカトリ 経営企画室長 福光 秀之  
〒634-8580 奈良県橿原市新堂町313番地の1  
電 話 : 0744-24-8580  
FAX : 0744-24-6616  
e-mail : [hideyuki.fukumitsu@takatori-g.co.jp](mailto:hideyuki.fukumitsu@takatori-g.co.jp)

## 第2章 研究開発

### 2-1 想定される面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化

ワイヤーソーで加工条件の最適化を進めると、影響する因子が非常に多い。また、その因子は、大きく分類して2種類あり、装置や部材などハード面での因子、加工条件などソフト面での因子が存在する。

本項以降で述べる最適化は、ソフト面の因子を最適化する事を目的とした。図 2-1-1 に、ハード面およびソフト面の因子を示す。

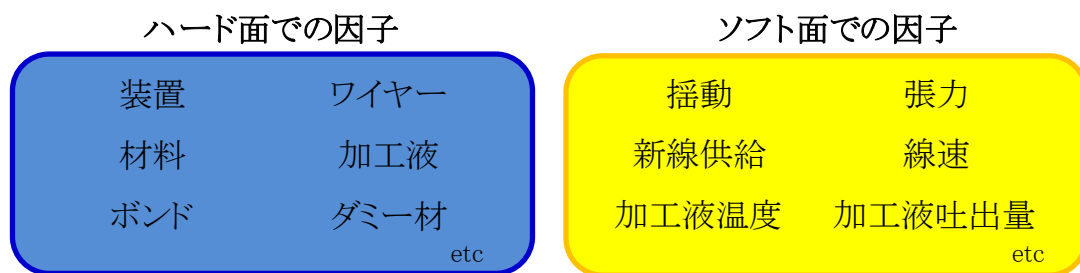


図 2-1-1 加工に影響を与える因子

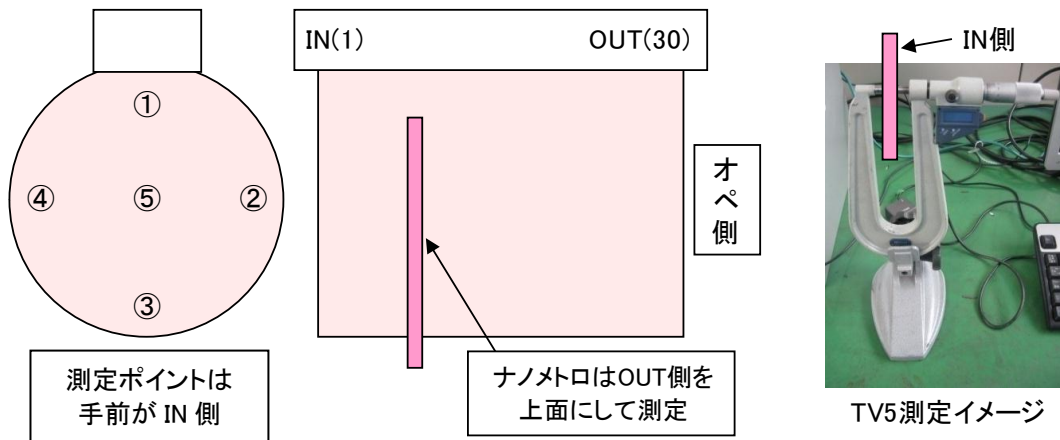
#### ■■評価項目および評価理由■■

今回、加工後のウエハ評価として、ウエハの厚みばらつき評価(TV5)、ウエハの反りを評価する表面形状評価(反り)、切断面の表面粗さの評価(Ra)の3項目を実施した。表 2-1-1 に評価項目と測定器の関係を示す。

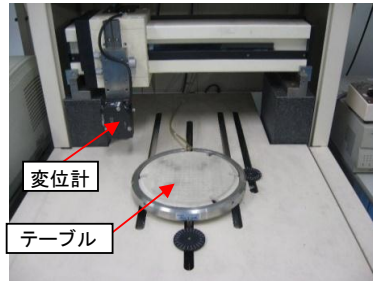
表 2-1-1 測定項目および測定器

測定項目	測定器
TV5	マイクロメーター(ミットヨ)
表面形状	ナノメトロ330F(黒田精工)
	FT-900(ニデック)
表面粗さ	VK-8700(キーエンス)
	SV-3000 CNC(ミットヨ)

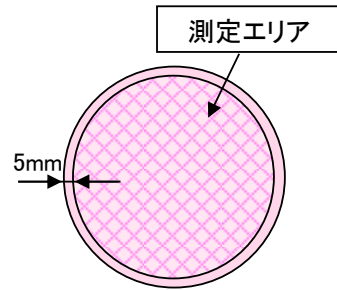
次ページに、測定箇所および測定機器の写真を示す。



ナノメトロ 330F



ナノメトロ測定イメージ



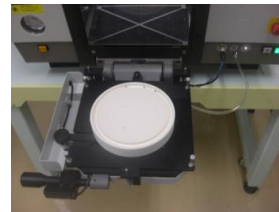
ナノメトロでの測定方法



ニデック FT-900



反り・BOW用チャック

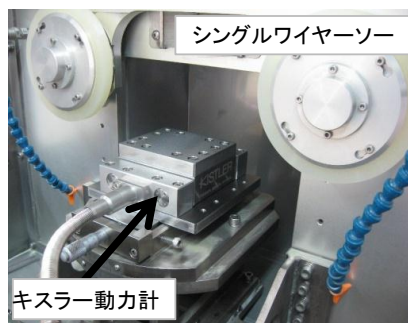


GBIR用チャック

測定用アタッチメント(ニデック)



表面粗さ計 SV-3000CNC



表面粗さ計 SV-3000CNC



レーザー顕微鏡

図 2-1-2 測定機器および測定方法の図



## 2-1-1 従来の加工条件による切断精度の検証 (3 インチサファイア)

従来のサファイア切断条件は、線速 400～500m/min 張力 35N が一般的である。そのため、線速、張力に関しては、この数値を基準とし、加工に影響を及ぼすとされる因子を検証した。比較をおこなうにあたり基準となる加工条件を設定した。この条件を基準として、揺動角度、揺動速度、テンション、線速、正逆運転サイクル、加工液吐出量および加工液温度等の因子を変更し切断精度の向上に起因する因子の検討をおこなった。

### 1) 揺動角度の違いによる反り比較

揺動角度を  $0^{\circ}$  ～ $10^{\circ}$  までの間で変化させ、その際の加工精度の違いを評価した。加工結果から、揺動角度  $3^{\circ}$  ～ $7^{\circ}$  で反りの値が良好であることがわかった。その他の知見として揺動角度が大きくなるにつれてワイヤーの送り方向の形状がS字になっているのが確認出来た。揺動動作ありと揺動動作なしの場合では揺動動作ありで表面粗さの良化がみられた。同品質のワイヤーでありながら、加工条件によって表面粗さが低減しており、これは揺動による効果と考えている。

### 2) 揺動速度の違いによる比較

揺動速度により、ウエハの表面を通過する回数が増大し、表面の形状を良化させる事を期待して実施した。結果として、揺動速度を増加させる事で反りの値が良化した。表面の反り低減が確認出来た。特に切断方向の反りが少なくなった事が確認出来た。S字状の反りに関しては、同様に発生している事から、揺動動作特有の曲線であると考えられる。揺動速度の違いによるウエハ厚みの差はみられなかったが、揺動速度が上がるとウエハ 1 枚当たりの厚みのばらつきは大きく低減している事が確認出来た。

### 3) 張力の違いによる比較

ワイヤーは、切削に使われる他の工具と比較して剛性がない。しかし、切削するには、ワークに対して負荷をかける必要がある。負荷をかけるとその反力でワイヤーも変形(たわむ)する。ワイヤーには張力が負荷されているため、反力と変形により発生する張力の合力が釣りあうところでたわみは止まる。つまり、張力が大きいほどワイヤーが形状を保った状態(たわまない状態)で切断出来ることを意味している。結果、張力を負荷することで加工精度の向上がみられた。張力の増加により、ウエハ厚みが増す傾向がみられた。

#### 4) 線速の違いによる比較

切削理論によると切削速度と送り速度は比例の関係にあり、切削速度を上げると送り速度を上げる事が出来る。この事から、まずは加工時間短縮のため切削速度である線速だけを上げて実施した。結果としては、加工精度(反り形状)の向上がみられた。しかし、表面粗さや厚みに関しては違いがなかった。

#### 5) 加工液吐出量の違いによる比較

加工精度に影響する因子として、加工液の潤滑性、冷却性そして洗浄性がある。その事から、加工液の吐出量を変えることによる精度向上を期待して実施した。結果として、吐出量を増やすことで加工精度の良化がみられた。

#### 6) 加工液温度の違いによる比較

加工液温度が加工精度にどのような影響を与えるか評価したものである。低温で切断した方が加工精度の良化傾向がみられたが、表面粗さへの影響はなかった。

## 2-1-2 高線速かつ高張力走行による切断精度の検証

加工時間の短縮や加工精度の向上、そして大口径化といった市場のニーズから、より早くより精度よくさらに大口径というテーマのもと加工条件の最適化を実施した。

2-1-1のテストは、従来の加工条件から各加工因子の特性を把握する事を目的にテストし各因子に対する知見が得られた。本項では、インゴットサイズの違い、線速の違い等の因子を変更する事によってどのように結果が変化するかを検討した。検討したインゴットサイズは、3 インチ、4 インチ、6 インチそして8 インチのテストを実施した。

### 1) 3 インチインゴットでの検証

#### 1-1) 加工液温度の違いによる比較

2-1-1の加工テストから、加工温度により精度の向上がみられた。その事から追試実験として加工液の温度を3水準設定した。第一次の結果では、低温度での加工精度が良いという結果であったが、大きな違いはなかった。その他の表面粗さとうにかんしても違いはみられなかった。

#### 1-2) サイクル数の違いによる比較

ワイヤーソーにおいては、ワイヤーを正転、逆転させながら切断を実施している。切り返しの際に、一時的に停止するためワイヤーが動かない時間が存在する。そこで、線速を表す際は、最高線速と平均線速という表現をする。その中で、サイクル数を減らすという事は、最高線速と平均線速の値が近づく事を意味する。平均線速が上がると加工精度や加工時間の向上等が期待出来るといわれているため、サイクル数を変えてテストを実施した。

結果として、低サイクル時に反り精度が悪化した。また、同時にワイヤーのたわみ量についても検討した。結果として、サイクル数が少ないと、たわみ量も小さくなった。

#### 1-3) 加工時間の違いによる比較

切削理論では、加工速度は、使用する工具や加工する材料によって最適な条件があるといわれている。今回の実験でも最適な条件が存在すると考えテストを実施した。水準としては、加工時間を6時間40分と、その半分に設定したものの2水準を用意した。結果としては、半分の時間で切断した結果の方が良好であった。この結果から、従来の切削速度で切断すると今回の線速では切削抵抗が小さくなり過ぎると考えられる。

#### 1-4) 揺動角度の違いによる反りの比較

2-1-1 の実験結果から、切断精度と揺動角度には関係性がある事がわかった。この事から、2-1-1 で未実施の揺動角度  $5^{\circ}$  と実施済みの  $3^{\circ}$  の 2 水準でテストした。結果として、揺動角度を  $5^{\circ}$  で加工精度の良化がみられた。また、たわみに関しては揺動角度が大きいほどたわみ量が小さくなった。過去に、静的な環境下にてワイヤーのたわみと動力計にかかる負荷というのを評価した際に、たわみとワークへの負荷に相関がみられた。揺動角度の大きい方がワイヤーのたわみが少ないことから、角度を大きくした方がワークへの負荷が小さい。すなわち、切削性が向上していると考えられる。切削が容易に進んでいる事も切断精度向上の理由と考えられる。

### 2) 4 インチインゴットでの検証

#### 2-1) 新線供給量の違いによる比較

新線供給量は、ワイヤーを送り出す際に設定する項目である。この新線供給量を減らしても加工精度が低下しないということは、加工コストの低減を意味する。その事から、上記内容を目的としてテストを実施した。新線供給量は 50m/枚とその半分の 2 水準を設定した。テスト結果から、ワイヤー使用量が少ないと反りの精度が悪化した。ワイヤーのたわみに関してはワイヤー使用量が少ないほどワイヤーのたわみ量が大きくなった。厚みばらつきは、新線供給量が少ない条件でウエハ内での厚みばらつきが少なくなった。

#### 2-2) 加工速度パターンの違いによる比較

切削理論において切削速度と送り速度は、工具の材質および切削物の材質によって最適化が計られている。上記理論からワイヤーでの切削の最適化を検討した場合、ワイヤー剛性等の問題がある。その為、ワイヤーでの切断を全くの同値で扱う事は難しいが、ワイヤーソーでも同じように最適な条件があるのではないかと考えた。この考えのもと、加工速度を 3

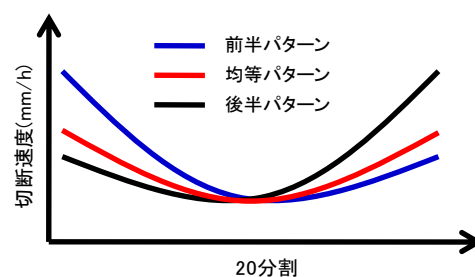


図 2-1-3 切断速度パターン

水準用意して切断条件の最適化を実施した。切断パターンとしては、前半速いパターン、均等パターン、後半速いパターンと名前を付けた。今回のテスト結果では、均等パターンのテスト条件がもっとも良かった。この結果を、ワイヤーのたわみから検討する。ウエハ厚みに関しては、たわみ量の多い前半パターンが最も厚くかつインゴット全体での厚みばらつきも少ない印象を受けた。

### 3-2) 揺動速度の違いによる比較

第一次のテストカットにて、3 インチでは揺動速度の速い条件の方が切断精度は良好であるという結果が得られていた。しかし、6 インチでは良好な結果を得ることが難しかった。揺動角度が同じであった場合、大口径になるほどワイヤーとインゴットの接触する長さは多くなり、揺動によるワイヤーの振り幅もインゴット径が大きくなるほど影響すると考えられる。この事から、切断条件が切断能力を越えた場合には、インゴットの端の部分で切断出来ていない部分が発生する。このことから、揺動角度は変えずに、揺動速度を落とした場合にどのように切断精度およびたわみ量が変化するか検討した。結果として揺動速度が遅い条件で切断精度が良化した。数値としては、全体的に 20 $\mu\text{m}$  の反りの軽減(20%減)がみられた。今回の結果から、揺動速度の遅い条件で表面粗さの良化もみられた。

### 4) 8 インチインゴットでの検証

6 インチまでで得られた加工ノウハウをもとに 8 インチでのサファイアのテストカットを実施した。6 インチでは揺動速度が小さい程、加工精度が良化したことを考慮してテストを実施した。右図に示したように 8 インチウエハの反りを 60 $\mu\text{m}$  以下に低減する事が出来た。この事から、大口径のウエハでは揺動を低速にする事により一定の効果が得られる事がわかった。

## 2-2 想定外の面精度に影響を与える発生要因の解析と定量化

### 2-2-1 試作機での検証

2-1-2 のテストカットまでは MWS-68 と呼ばれる装置で加工条件の最適化を実施してきた。一方、MWS-612DD と呼ばれる従来機をベースとして改良した MWS-612DR、そして次世代機として MWS-612DN を開発した。このことから、装置の形状や剛性の効果に対する評価も含めて試作機での加工テストを実施した。

#### 1) 装置の違いと加工条件の関係

##### 1-1) 装置の違いと加工条件の関係①

MWS-68 で加工因子の効果を把握後、MWS-612DR での加工テストを実施した。まず、MWS-68 との装置形状の違いを比較するためのテストを実施した。図 2-2-1 に装置間の違いを示す。ワークローラーと呼ばれる軸が 2 軸 (MWS-612DR) と 3 軸 (MWS-68) と構造が違うところである。この場合、ワークローラーにかかる負荷が異なる。また、MWS-612DR では大口径でかつ長尺の加工物を切断する事を目的としたため、ワークローラーの軸の長さが異なる。その事により、若干ではあるが MWS-612DR の方が強度的に劣る。ワークローラー部のみを考慮した場合、MWS-612DR の方が剛性に関して影響がでるのではないかと考えたが、切断結果としては同等であった。

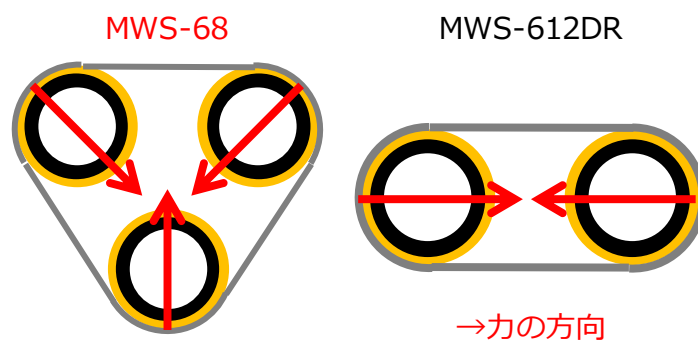


図 2-2-1 装置構成の違いに関するイメージ図

## 1-2) 装置の違いと加工条件の関係②

1)で3軸と2軸の装置による比較検討を実施した。次に、従来機であるMWS-612DDと、改良型のMWS-612DR、新規開発のMWS-612DNに関して同条件で加工テストを実施した。装置間の違いとしては、MWS-612DDとMWS-612DRでは装置剛性が強化されている。MWS-612DNに関しては、装置剛性が向上しており、かつ揺動機構が他の2機種と異なる形状を示している。これらの違いを比較検討した。結果から、MWS-612DRでの結果が良好である事が示された。MWS-612DDとDRでは、DRの装置剛性が強化された効果が出たと考えられる。

## 2) 揺動動作と加工精度の関係

揺動動作プログラムの項目で動作の詳細について述べた(2-3-2参照)。作成された動作プログラムの有効性を検証する為に、従来の揺動プログラムとSinカーブ揺動プログラムでの切断加工を実施した。揺動動作をSinカーブ揺動に設定した場合の方が切断精度の良化がみられた。厚みばらつきに関しては、Sinカーブ揺動を実施した加工の方が全体を通して厚みばらつきが安定している事が確認された。

## 3) 試作機による加工技術の最適化

MWS-68での加工条件最適化で得られた知見をもとに6インチのサファイアインゴットのテストを実施した。今までのテスト結果から、揺動速度が加工精度に与える影響が大きかったため揺動速度をさらに遅くした。揺動速度を350deg/minから50deg/minに変更したところ、反りの値は低減した。今回の結果からも揺動速度の効果が実証されたと考えている。

## 2-3 マルチワイヤーソーの試作開発

本事業を実施するにあたり、装置の試作をおこなった。試作した装置は MWS-68、MWS-612DR、MWS-612DN の 3 機種である。それぞれの装置のコンセプトを以下に述べる。

### i MWS-68

ワークローラーの軸長を従来機の MWS-610SD から 50mm 短くして、張力を付加し、切断時の剛性を向上させる事を目的とした。

### ii MWS-612DR

従来機の MWS-612DD と比較して装置の本体プレートを厚くすることで装置の剛性を向上させ、切断時の振動抑制による加工精度の向上を目的とした。

### iii MWS-612DN

従来機の MWS-612DD と比較して装置の本体プレートを厚くすることで装置の剛性を向上させ、切断時の振動抑制による加工精度の向上を目的とした。  
また、従来機とは異なる揺動方式を採用した。

### 2-3-1 試作機の試作

#### 1) MWS-68 の主な特徴

線速	: 1000m/min
張力	: 45N



図 2-3-1 MWS-68 外観図



## 2) MWS-612DR の主な特徴

線速	: 1000m/min
張力	: 45N
タンク	: 200L(1体型2槽タンク)
スピンドル	: 強化スピンドル
微調テーブル	: 強化テーブル



図 2-3-2 MWS-612DR 外観図

## 3) MWS-612DN の主な特徴

線速	: 1200m/min
張力	: 45N
タンク	: 200L(1体型2槽タンク)
スピンドル	: 強化スピンドル
微調テーブル	: 強化テーブル



図 2-3-3 MWS-612DN 外観図

## 2-3-2 揺動動作プログラム

### 揺動動作プログラムについての説明

今回の開発で新たに追加した機能として揺動動作がある。揺動動作とは、右図に示した、加工室中のワークローラーが振り子のように左右に往復運動をおこなう機構である。なお、追加機能とは、以下に示す揺動動作のことである。



図 2-3-4 揺動動作の説明図

- ① Sin カーブ揺動
- ② 揺動加減速

の 2 点である。まずは、これらの機能を知る上で従来から適用されている揺動動作とその問題点を以下に述べる。

### 1) 従来 of 揺動

従来 of 揺動 of 基本的な考えは、揺動方向 of 切り替えによる加減速(灰色部)を極力少ない形にして揺動速度を最高到達点にするような設定となっていた。

また、加減速時間 of 設定を変更することが出来なかった。そのため、加工物 of 形状 of 違いや材質 of 違いによる変化に対応する事が出来なかった。

### 2) Sin カーブ揺動

Sin カーブ揺動とは、ワークローラー of 左右への振り幅 of 一番大きいところ(最も傾きの大きいところ)での速度を遅く、中央部での揺動速度を早くする揺動方式で出来る限り均等に切断することを目的に作成された動作プログラムである。従来 of 揺動と比べて左右への振り子運動 of 移行が円滑であることが特徴として挙げられる。

### 3) 揺動加減速

基本的な動作は、従来 of 揺動動作と同じであるが、異なる点は到達したい揺動速度までの時間を任意で決められるようになったことである。

### 2-3-3 試作機の性能評価

#### 1) 振動に関する評価

マルチワイヤーソーにおいて、加工後に得られるウエハに対しての加工精度は、数十マイクロンオーダーである。その事から、加工時に発生する振動を抑制する事が、加工精度の向上につながる。そこで、我々は、試作したワイヤーソーの評価として、従来のワイヤーソーと試作したワイヤーソーの振動測定を実施した。測定条件は、線速 500m/min と 1000m/min である。結果として、MWS-612DD で数値が最も大きくなったことから、今回設計した MWS-612DR、MWS-612DN においては、装置の振動に関する効果がみられることが確認出来た。

#### 2) 騒音に関する評価

ワイヤーソーの高速走行では、駆動部での騒音が大きくなるという問題が発生する。今回の試作機では、ワークローラーとモーターとの間に接続するベルト部分の構造を改良する事および防音材の材質を考慮することにより騒音低減のための改良をおこなった。

効果が顕著に現れたのは、左右の側面での騒音および背面である、500m/min ではどちらの装置でも大きな違いはみられなかったが、線速 1000m/min でのテストでは、左右及び背面では 3~5dB の消音効果が確認された。

## 2-4 最適切削工具及び加工条件の確立

### 2-4-1 ワイヤソーにおける切断抵抗の研究

#### 1) 概要

##### 1-1) はじめに

ワイヤソーによる加工は、硬脆材料の切断の高速化・高精度化が求められている。この加工法は、切削工具による切削加工に比べて歴史が浅く、研究者の数も圧倒的に少ない。さらに各企業でのノウハウが機密にされているため切削加工のそれのように一般化されていない。

切削加工の場合、切削速度や切削抵抗などの条件が工作機械、工具、ワークの組み合わせで最適とされるものがあり、これを工程中一定に保つことで、精度をある程度高めることができる。ワイヤソーにおける加工でも、好条件を一定に保つことで、ある程度の精度を得られるのではないかと仮定して本研究をおこなった。

##### 1-2) 推論

今回の研究の基となる切断加工の式を以下に示す。

ワイヤソー加工に切削理論を適用すると

$$\frac{v}{V} = \text{一定} = Wc \quad \text{---(i)}$$

{	<b>【定義】</b>
	V: ワイヤ線速 mm/min
	v: 加工速度 mm/min(ワーク送り速度)
	Wc: 切断重

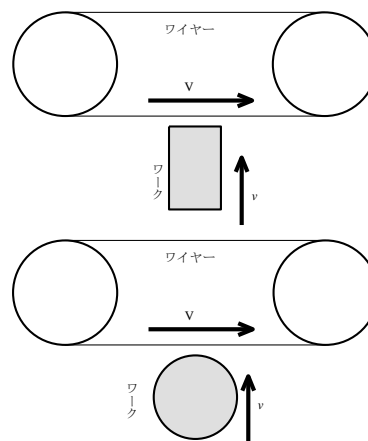


図 2-4-1 切断重 Wc のイメージ図

となり、ワイヤ速度を高めると加工速度も高めることができ、結果切断時間が短縮される。

しかし、ワークの形状は四角柱状のものだけではなく円筒状のものもある。円筒状のものでは切断が進むに従ってワイヤとワークの接触長さ L が変化するため、(i)の考え方では切断時に発生する抵抗を説明できない。

そこで、切断のためにワイヤーがワークと接触している長さLは大きくなれば切断しにくくなると考え、切断作業時に発生する切断抵抗として切削理論を拡張し、次のように考えた。

$$\frac{v \cdot L}{V} = \text{一定} = R_c \quad - (ii)$$

- 【定義】
- V : ワイヤー線速 mm/min
  - v : 加工速度 mm/min (ワーク送り速度)
  - L : ワイヤーの接触長さ mm
  - R<sub>c</sub> : 切断抵抗

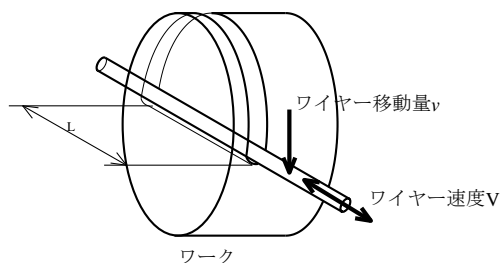


図 2-4-2 切断抵抗 R<sub>c</sub> のイメージ図

この切断抵抗 R<sub>c</sub> を切断加工中、終始一定に保つことができればワイヤーに加わる抵抗も変化せず切断方向に直進性を高めるものとする。

また、R<sub>c</sub> の値は、ワークの材質、ワイヤーの種類等により最適となる値があると推測される。もちろん、切削加工同様、工具に対して適当な負荷が加わらなければならないため、R<sub>c</sub> は小さすぎる場合も不適當であると想像がつく。

本研究では、以下の事項について明らかにするものとする。

- ① φ80mm のガラスの切断により適当と思われる R<sub>c</sub> 値を探す。
- ② R<sub>c</sub> 一定で作業した場合の切断表面に与える影響
- ③ その他

## 2) 実験

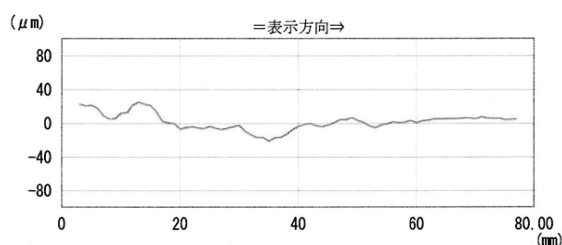
### 2-1) 加工速度一定実験

#### 2-1-1) 実験目的

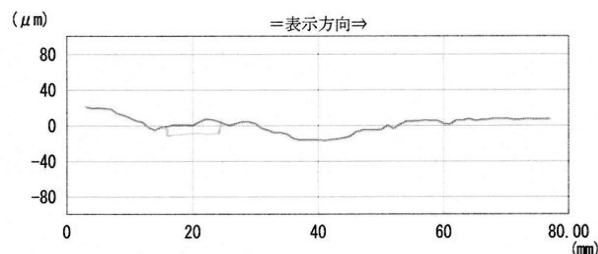
ワイヤー加工は変数となり得る条件が非常に多いと考え、それらの変数条件をできるだけ簡素化するため、ワイヤー接触長さLを考慮せず加工速度を一定として行うことにした。その過程において比較的良好な切断結果を示す数値がないかを探ることを目的とする。

#### 2-1-2) 実験データと評価

##### ナノメトロによる表面曲線



No 1-300×0.9→ $Wc=3 \times 10^{-6}$   
20~30mm が安定  
 $Rc \ 0.24 \sim 0.26 \times 10^{-4}$



No2 -300×1.7→ $Wc=5.67 \times 10^{-6}$   
15~20mm が安定  
 $Rc \ 0.35 \sim 0.40 \times 10^{-4}$

加工速度を一定としたときの切断抵抗( $Rc$ )の変化は、下図のとおりである。

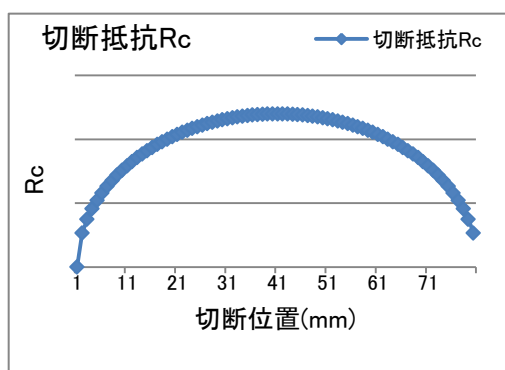


図 2-4-3 切断抵抗と切断位置の関係

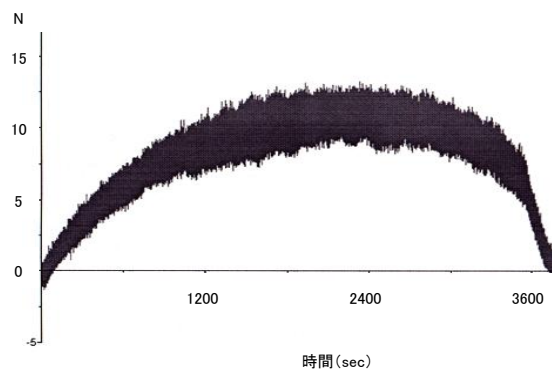


図 2-4-4 動力計測定結果(切断方向)

切断抵抗は、ワイヤー接触長さLの増減とともに変化する。

切断方向に加わる荷重も  $Rc$  に応じて変化している。

### 2-1-3) 結果まとめ

以上の実験をとおして以下のようにまとめられる。

ワイヤーが比較的直進していると思われる部分は、ワイヤー接触長さ  $L$  を考慮した切断抵抗  $R_c = 0.23 \sim 0.42 \times 10^{-4}$  である

### 2-2) 切断抵抗一定実験

#### 2-2-1) 実験目的

前述の実験から切断抵抗  $R_c$ :  $0.20 \sim 0.45$  が適当ではないかと考えられるので、条件がこれらになるように制御し、結果を検討する。

制御には、機械の機能として搭載されているレシピファイルの 25 段階の段階制御を用いる。

#### 2-2-2) 実験データと評価

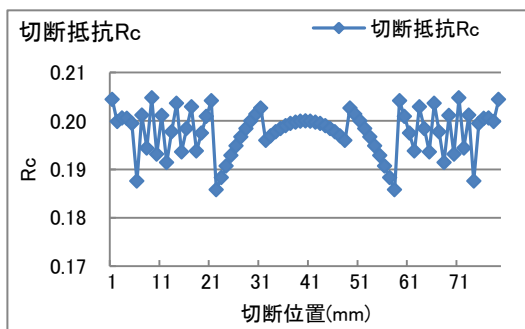


図 2-4-5 切断抵抗と切断位置の関係

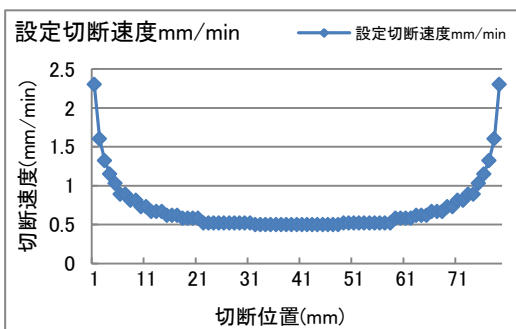


図 2-4-6 加工速度と切断位置の関係

また、このときの切断方向に加わる力は、図 2-4-7 のようになった。この図から分かるように、4N 程度でほぼ一定に見える。表面の形状を調べると、ワークの切断位置にして、0~40mm までと 40~80mm までの振れが明らかに違うことがわかった。切断抵抗  $R_c$  を一定にするためにワイヤー位置で加工速度を変化させているが、ワイヤーがたわむことで制御ワイヤー位置に対して実切断位置が遅れていることにより、適切に速度制御が進んで制御していることが分かった。

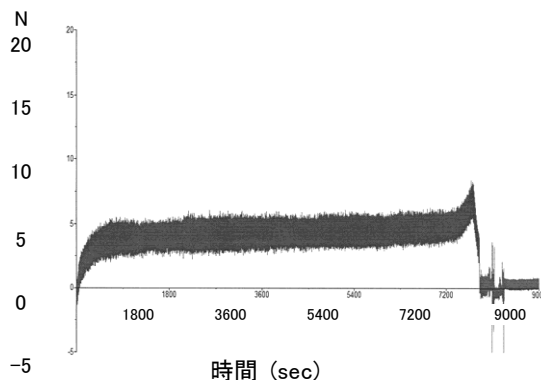


図 2-4-7 動力計測定結果(切断方向)

### 2-2-3) 結果まとめ

このことから、たわみ量を考慮して実際に切断している場所における加工速度を算出しなければ目的とする切断抵抗は得られない事が分かる。

### 2-3) 模擬フィードバック実験

#### 2-3-1) 実験目的

切断中 1mm ごとに動力計から切断方向の力  $F_z$  を測定し、その値を逆算してワイヤーのたわみ量とした。そのたわみ量から実際の切断位置を計算し、加工速度を決定、入力するという方法をとる。測定と、条件入力のため中断はするが、制御パルスが非常に少ないフィードバック制御の形である。ワークは直径 80mm なので 80 回の制御を行った。

#### 2-3-2) 実験データと評価

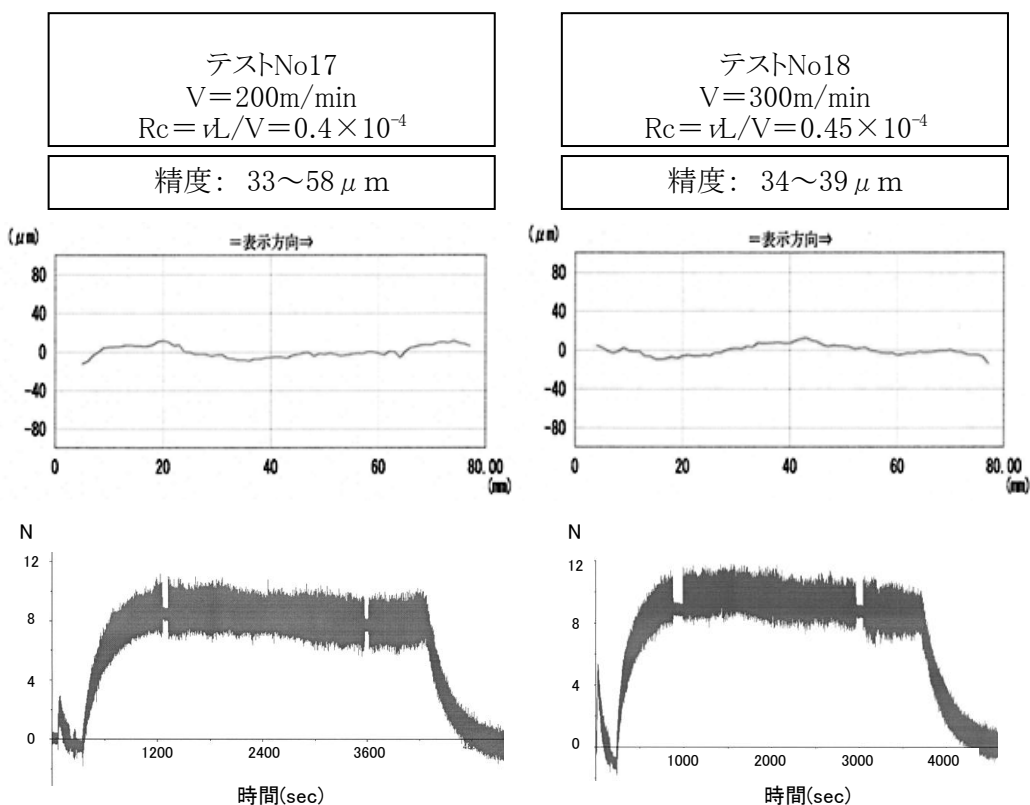


図 2-4-8 動力計測定結果(切断方向)

図 2-4-9 動力計測定結果(切断方向)



### 2-3-3) 結果まとめ

どちらの結果も動きは滑らかに見えるが、SORI  $30\ \mu\text{m}$ を下回る精度になっていない。1～3のワイヤーの場所によって動きの違いがあまりにも目につく。

このテストでは、一度実際のたわみを測定するという無駄ともいえるテストを行ったが、より実際の切断位置に合った制御をすることで切断方向の力  $F_z$  を一定に保ち、安定して負荷を加えることができた。

### 3) まとめ

実験結果から切断抵抗  $R_c$  を一定にすることで、切断精度を大きく改善するには至らなかったが、以下のことがわかった。

- ① 切断抵抗  $R_c$  を一定にすることでワークを切断方向の力  $F_z$  を一定に保つことができ  
可能性が高い
- ② ワークを切断するための力  $F_z$  は加工速度とワークが実際に切断されている速度との差  
から生み出されるワイヤーのたわみである
- ③ ワイヤーのたわみは、テンションと加工速度に大きく影響されるが、ワイヤー線速の大きさが、  
比例的に上昇するたわみを押さえる働きをしている

## 2-4-2 ワイヤー断線のメカニズム

ワイヤーソーにおいて加工中の断線は、大きな問題である。こういった事から、ワイヤー断線の発生に影響する因子を抽出した。次に、その中から検証可能と考えた項目について実験手法を考え実施した。

### 1) 断線原因の抽出

断線原因の抽出にはブレインストーミングの手法を用いた。可能性の有無にこだわらず、出来る限りの思いつく原因を列挙した。その原因として列挙した項目を、ワイヤー要因、装置要因、材料要因、加工液要因、といった大きなくくりで分類し特性要因図を作成した。

以下に、そこで作成した特性要因図を示す。

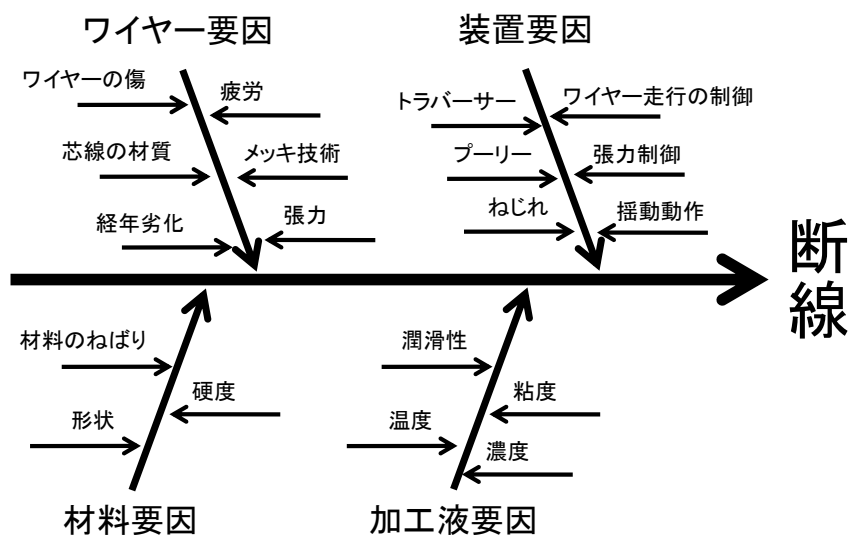


図 2-4-10 断線原因に対する特性要因図

### 2) 実験方法

現在もっているリソースと上記に示した特性要因図から、実施可能な項目を選定し、今回はこの中のワイヤーの傷という部分に着目して検証を実施した。実施内容としては、ワイヤーに対して意図的に傷をつけ引張試験機にかけるというものである。各評価設備に関しては社内に保有していないため奈良県工業技術センターの設備を利用して実施した。また、そのワイヤーの破断面を電子顕微鏡によって評価するという手法を用いた。サンプルとして損傷していないワイヤーと損傷させたワイヤーの 2 種類を準備した。ワイヤー損傷の方法としては、一定の溝が作成された治具にワイヤーを挿入し一定の傷が付くようにカッターで傷をつけた。それによって傷つけられたワイヤーと傷なしのワイヤーの破断面を確認した。

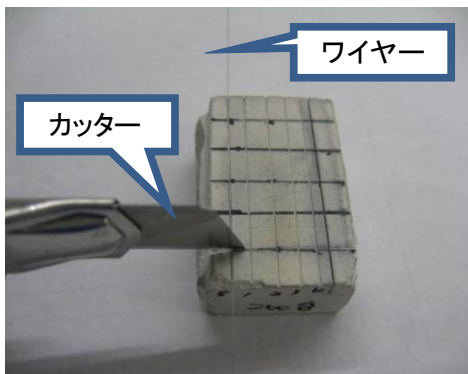


図 2-4-11 損傷ワイヤーの作製図



図 2-4-12 使用した引張試験機

### 3) 実験結果

図 2-4-13 に、ワイヤーに対して傷をつけた場合と付けていない場合を比較した SEM 写真を示す。SEM 画像を見たところ、損傷部分のない場合とある場合でデンプルと呼ばれる金属が破断破断した際に見られる現象が見られた。また、発生している位置が損傷なしでは中央部であるのに対し、損傷ありでは端に存在している傾向にある事がわかった。

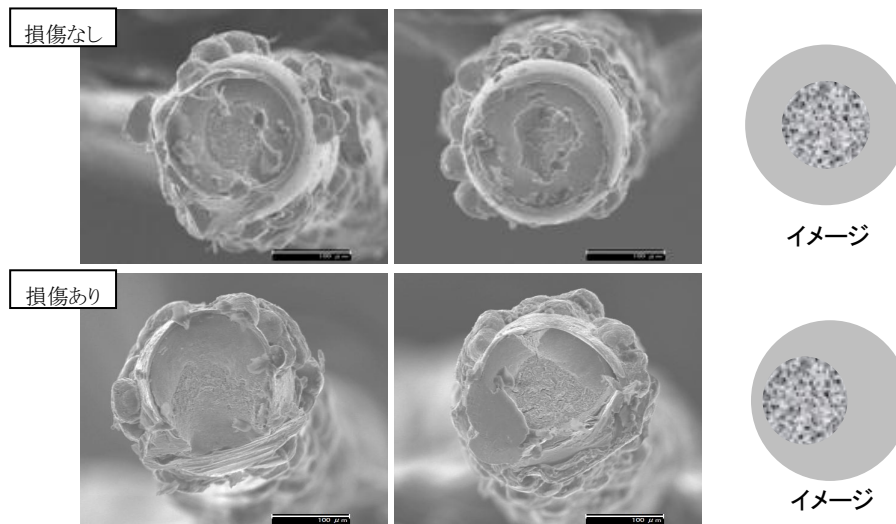


図 2-4-13 損傷の有無によるワイヤー断面の SEM 写真

### 4) まとめ

今回の試験で、上記の現象がみられた事からワイヤーに傷が存在して断線が発生した場合には、結果で示したような傾向にある可能性のある事がわかった。この事から、断線発生時の断面を観察する事でデンプルの発生場所が変化していた場合にはワイヤーの損傷の可能性があると知見が得られた。

### 2-4-3 サファイアの加工特性の解析

#### 1) 概要

サファイアのような脆性材料の加工では、鉄のような延性材料でみられる延性モード研削ができないと考えられている。一般的に延性モード研削が可能な延性材料よりも、脆性材料は加工面の面精度が出にくい材料である。

サファイアの高精度加工を目的とする当研究において、サファイアの加工特性に関する知見は不可欠と考え、ダイヤモンドツールを用いてサファイアに傷をつけ、観察する研究を行った。

これにより、切削条件が、切削モード(延性モード、脆性モード)に及ぼす影響を調べ、サファイアの切削に適した加工条件を検討する。

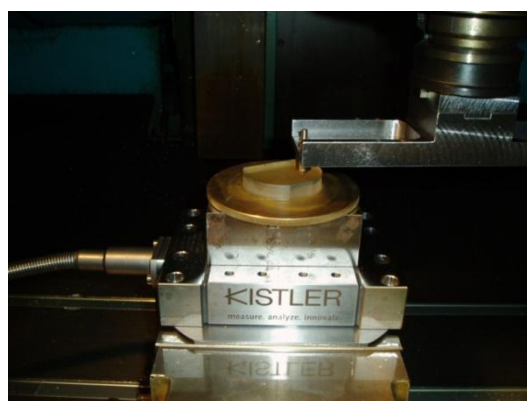
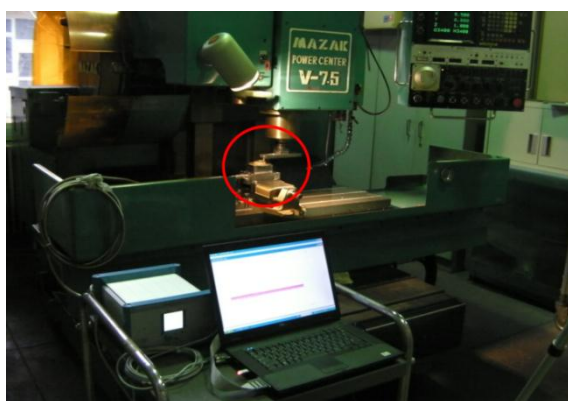


図 2-4-14 マシニングセンタを利用した実験装置

#### 2) 実験方法

360m/min、715m/min、1074m/min の速度でダイヤモンド単粒工具をサファイアガラスに押しつけてその際に得られた加工溝を顕微鏡にて観察した。

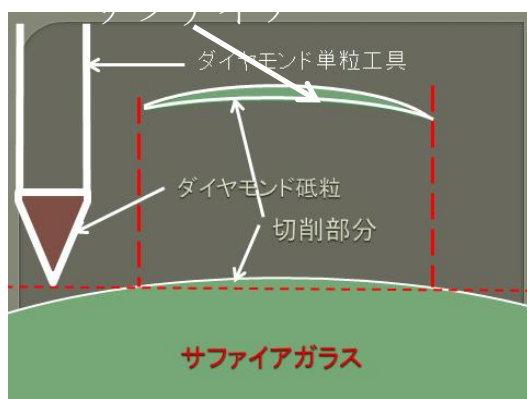


図 2-3-15 ダイヤモンド単粒工具による実験方法の図

## 2-1) 切削速度の影響

図 2-4-16 に示す通り、サファイアに異なる切削速度で、サファイアガラスに付けた傷の切削幅が  $15\ \mu\text{m}$  である地点を計測した。切削幅が  $15\ \mu\text{m}$  と同じであれば、工具形状が決まっているため、切り込み量は同じになる。

脆性モードは、合力変動が大きくなり、延性モードは、合力変動が小さいという特徴があることから、切り込み量が同じで、合力変動が小さい場合は延性モード切削の可能性が考えられる。

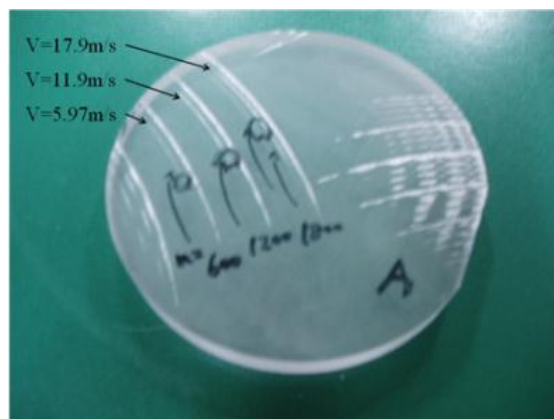


図 2-4-16 切削速度の影響

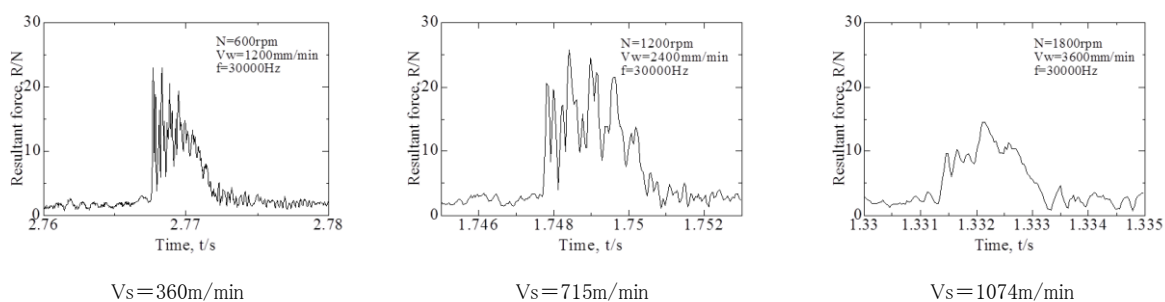


図 2-4-17 切削速度別の合力変動

図 2-4-17 に示される通り、加工深さが同じ場合に、切削速度が  $1074\text{m}/\text{min}$  と高速域のみ、合力の変動が凡そ半分に小さくなっている。よって、切削速度を早くすることで、延性モード切削になる可能性があることがわかった。

## 2-2) 切り込みの影響

次に、切削速度を  $360\text{m}/\text{min}$  と一定にし、切削の開始付近、中間付近、終了付近の観察を行った。これにより、同じ速度で切削しても、切り込みが違う状態を観察することができる。



図 2-4-18 切り込みの影響

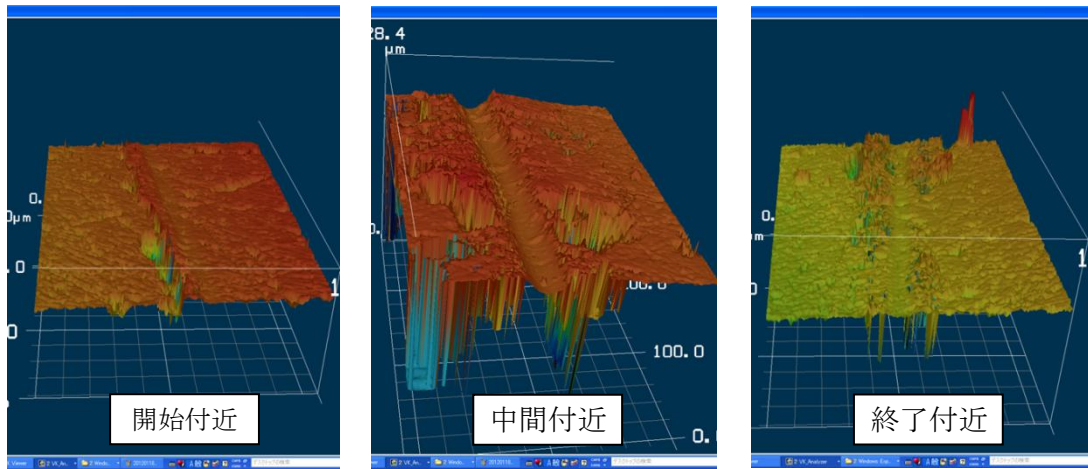


図 2-4-19 切り込み別の切削部

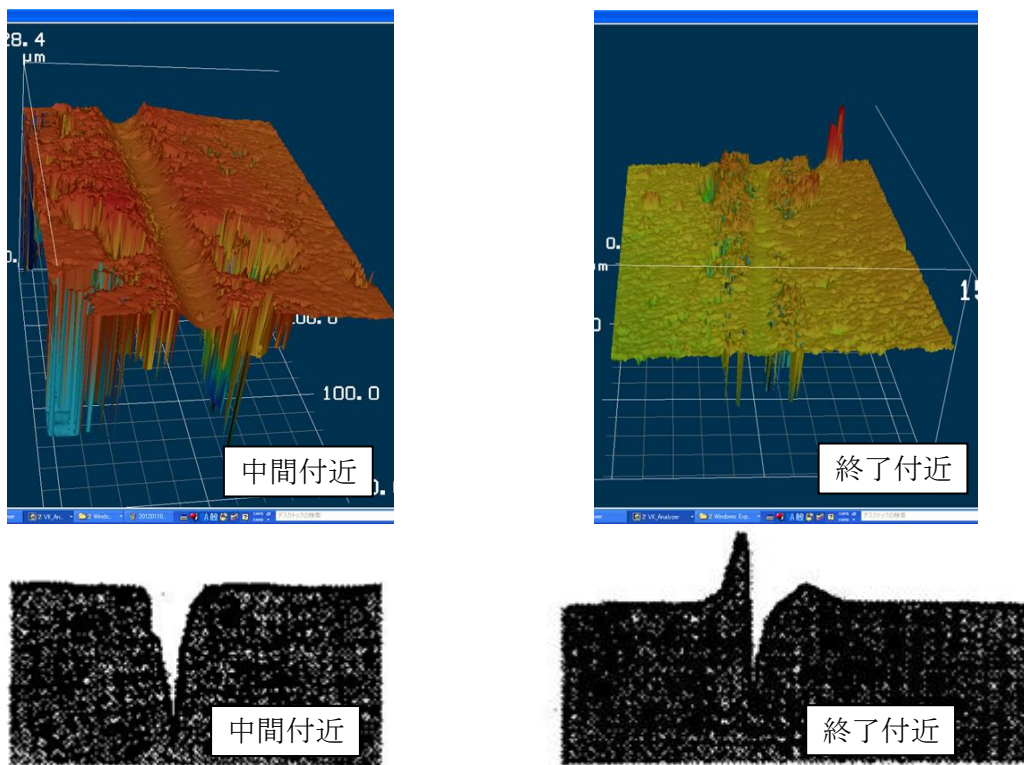


図 2-4-20 切り込みの影響

図 2-4-20 に示される通り、中間付近は切り込みが大きく、脆性破壊が主な切削モードとなるが、終了付近は、切り込みが小さく、塑性変形による盛り上がりが見られる。よって、切り込みが小さければ、延性モード切削になる可能性があることがわかった。

### 3) まとめ

- ① 線速を高速にすることによって、砥粒 1 個当たりの切込みが小さくなるので、加工速度を大きくすることができ、切断時間を短縮することが可能である。
- ② 線速を高速にすることによって、脆性モード切削から、延性モード切削へ移行し、良好な仕上げ面を得ることができる可能性がある。

## 第3章 全体総括

### 3-1 研究開発の成果

サポイン事業によって得られた技術的成果は多岐にわたる。まず、装置の試作開発である。中小企業にとって装置開発にかかる費用は膨大である為、容易に試作機を製作するという事は困難である。今回は、従来機とは全く考え方の違う試作機を作成する機会を得た。特に高線速、高張力において大きな問題となった断線に関しては本事業で様々な知見を得た。

また、その装置を通じて装置設計における知見を得ることが出来た。さらに、装置だけでなく装置内のシステム(ソフト)に関してもさまざまな試みをする事が出来た。特に、Sin カーブ揺動や揺動加減速といったソフトは本研究を実施していく過程で実現したシステムである。

加工技術に関しては、加工対象となる材料が非常に高価であるため加工に関しての系統だったノウハウ等を得ることが出来ていなかった。サポイン事業で購入した材料で実施した加工によってすべてが把握出来たとは言い難いが加工に与える因子の個々の効果を系統的に理解出来たと考えている。今回の事業を実施して得られた知見は最も大きな成果であるが、知見を得る上で必要とされた技術および知識についても成果として意味のあるものだと感じている。

[主な成果]

#### ① 全体目標の達成

図 3-1-1 6インチウエーハの面精度

	従来 of 精度	目標	研究後の精度	研究成果
反り	150 $\mu$ m	-	50 $\mu$ m	100 $\mu$ m 向上
TTV	30 $\mu$ m	-	15 $\mu$ m	15 $\mu$ m 向上
厚み	0.8~1.5 mm	-	約 0.8 mm	-

図 3-1-2 8インチウエーハの面精度

	従来 of 精度	目標	研究後の精度	成果(従来比)
反り	200 $\mu$ m	100 $\mu$ m 以下	60 $\mu$ m	140 $\mu$ m 向上
TTV	40 $\mu$ m	25 $\mu$ m 以下	15 $\mu$ m	25 $\mu$ m 向上
厚み	0.8~1.5 mm	0.8mm 以下	0.8 mm	-

#### ② 6 インチインゴットでの加工時間を 24h→12hへ短縮

#### ③ 高線速での断線発生を低減

#### ④ 揺動動作の機能追加



### 3-2 今後の課題

今回、さまざまな試みを実施した中で、当初に設定した反り精度は得られた。一方で、市況の変化と共に更なる高精度化の必要性もわかってきた。今後は、さらなる装置の改善及び加工技術の向上によって高精度化を目指していく必要があると感じた。また、今回作成した揺動システム等はある程度加工精度に対して効果はあるが、十分に検討されたとは言えない。これらの有効性を示すには追試が必要になると考えている。研究を実施するうえで得た測定器に関しては、評価をする上で非常に有効である事がわかった。一方で、それを実際に使用する測定者がスキルを要求される場面が多くみられた。測定によって得られる知見(可視化)から、現状の問題を解決していく手段が見つかる事も多かったと感じた。この事から、測定器をより有効活用していくための技術力向上が必要であると感じた。

### 3-3 事業化の展開

当事業がスタートし、1年を経過した昨年以前は、液晶バックライト向けのLED市場が急速に拡大を続け、サファイアウェーハの供給不足が続いていた。それに伴い、従来機となるタカトリ製マルチワイヤーソーの受注も活況を呈していたが、中国を中心にMOCVD装置(サファイアインゴットを作る装置)への設備投資が盛んに行われ、サファイアインゴットの供給過多から、結晶価格も前年の半分程度に落ち込んだ。中国企業のサファイア業界への参入に拍車を掛けたのは、太陽電池業界の不況で、それまで、シリコン業界に事業展開していた企業が一斉にサファイア業界にシフトしたことによる。

そうした中、当事業で開発テーマであった、大口径化に対するニーズは影を潜め、マルチワイヤーソーの受注も6インチ機が中心となっている。これは、大口径化することで、生産効率は上がり、コストダウンが見込めるものの、大口径化を進めるためには、マルチワイヤーソーだけではなく、後工程に膨大な設備投資が必要になるため、現在の市況では、8インチへのシフトはしばらく行われないと考えている。

そこで、8インチウェーハの加工条件の最適化については、従来の8インチ機を用いて基礎技術を確立し、研究目標は達成したものの、試作機については、今後も受注を見込める6インチ機(MWS-612DRとMWS-612DNの2台)を開発した。

平成24年8月頃より、客先へのアナウンスを開始し、既に客先から評価のためのテストカットも、10回以上実施している。

DNについては、高線速を可能としているものの、構造を大きく変更したために、加工結果に若干の不安定さがあり、量産化に向けては、改良の余地を残しているが、現在、自己資金で追加のインゴットを購入し、補完研究を実施している。

DRについては、従来機に比して安定した高性能を発揮していることから、既に量産設計を完了し、5台分(売価:約5千万円/台)の見込み生産を開始した。今後、販売活動を行っ

ていくが、客先の評価は概ね良好で、平成 25 年春頃には、数台の受注を見込んでおり、遅くとも年内には完売する計画である。

さらに、当事業開始以来、膨大なテストカットを行い、データを蓄積するとともに、分析を行ってきたが、現在でも分析は行っており、当事業末となる 12 月も、新たな特許取得に繋がる、より試作機の高度化に資する発見が 2 件あった。事業完了後になるが、平成 25 年夏頃までには量産設計に反映し、製品のバージョンアップを図りたい考えである。

以上