

平成27年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「樹脂コーティングワイヤーを用いたSiCウエハの
鏡面スライシング加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成28年3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
第 1 章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	11
第 2 章 本論	12
2-1 緒論	12
2-2 樹脂コーティングワイヤー加工の特徴	13
2-3 実施内容	14
【1】樹脂コーティングワイヤーに対応した加工条件の最適化・・・	14
【1-1】従来機を用いたスライシング性能の評価	14, 22
【1-2】従来機を用いた被加工材料別の性能評価	27
【1-3】試作機開発に必要な要求事項のまとめ	21, 30
【2】樹脂コーティングワイヤーに対応した加工部材の最適化・・・	31
【2-1】スラリーの最適化（種類、粒径、形状、濃度等）	32, 35
【2-2】被加工物の基材および接着剤の最適化	32, 41
【2-3】部材類の最適化のまとめと最適な組み合わせの抽出	35, 44

【3】 樹脂コーティングワイヤーの断線メカニズムの解析.....	50
【3-1】 各種条件下での破断強度評価	51
【3-2】 ワイヤー破断面解析	55
【3-3】 限界使用条件の評価	58
【3-4】 ワイヤー断線についての実機評価・検証	60
【4】 試作機の開発.....	68
【4-1】 装置剛性の検討	68
【4-2】 切削液経路の最適化	68
【4-3】 装置の低消費電力化	68
【4-4】 試作機的设计・製造	68
【5】 試作機の評価と新技術の効果の確認.....	73
【5-1】 試作機の剛性、スラリール路、温度の計測	73
【5-2】 試作機を用いた鏡面スライス加工技術の評価テスト	80
【5-3】 量産機開発に必要な要求事項のまとめ	88
【6】 量産機の開発.....	89
【6-1】 試作機を用いた評価結果のフィードバック設計	89
【6-2】 量産機的设计・製造	89
【6-3】 量産機を用いた鏡面スライス加工技術の評価テスト	91
 第3章 全体総括	 93
3-1 研究開発の成果	93
3-2 今後の課題	102
3-3 事業化の展開	103

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

S i Cは、高耐圧、低損失などの優れた電気特性から、次世代パワー半導体や超高耐圧半導体素子、高輝度LEDの基板材料としてニーズが高まっているが、ウエハコストが高く、普及のネックとなっている。コスト高の要因は、結晶製造が難しく、高価な材料であると同時に、高硬度難加工材料であることから、従来の遊離砥粒加工方式や固定砥粒加工方式では、加工時間が長く材料ロスが大きくなることが上げられる。

こうした課題の解決策として、株式会社コベルコ科研は、樹脂コーティングワイヤーを用いた遊離砥粒方式による鏡面スライシング加工法を提唱し、樹脂コーティングワイヤーの開発に成功した。樹脂コーティングワイヤーを用いた鏡面スライシング加工により、単に面精度が向上するというだけでなく、加工変質層の低減、ウエハの薄厚化が可能になると期待されるが、現在、基礎実験レベルの加工テストでは、効果が立証されているものの、実用化には至っていない。

これを受けて平成24年10月、株式会社タカトリは、金沢工業大学との共同研究により、「樹脂コーティングワイヤーによるS i C鏡面スライシング加工の評価」を行った。実験機を用いた評価テストの結果、縦5mm×横10mm×厚1mmのS i Cサンプル加工テストでは鏡面に近いウエハを作ること成功した。一方で、樹脂コーティングワイヤーの効果を十分に発揮するための加工条件が、従来のワイヤーとは異なることも明らかとなり、樹脂コーティングワイヤーの実用化に向けては、最適な加工条件の確立と、樹脂コーティングワイヤー加工に対応した装置開発が必要であることがわかった。

本研究では、樹脂コーティングワイヤーを用いたS i Cウエハの鏡面スライシング加工技術を確立し、薄厚化による材料ロスの低減、後工程の加工時間を短縮することにより、大幅なウエハ価格のコストダウンを目指す。

1-1-2 研究開発の目的及び目標

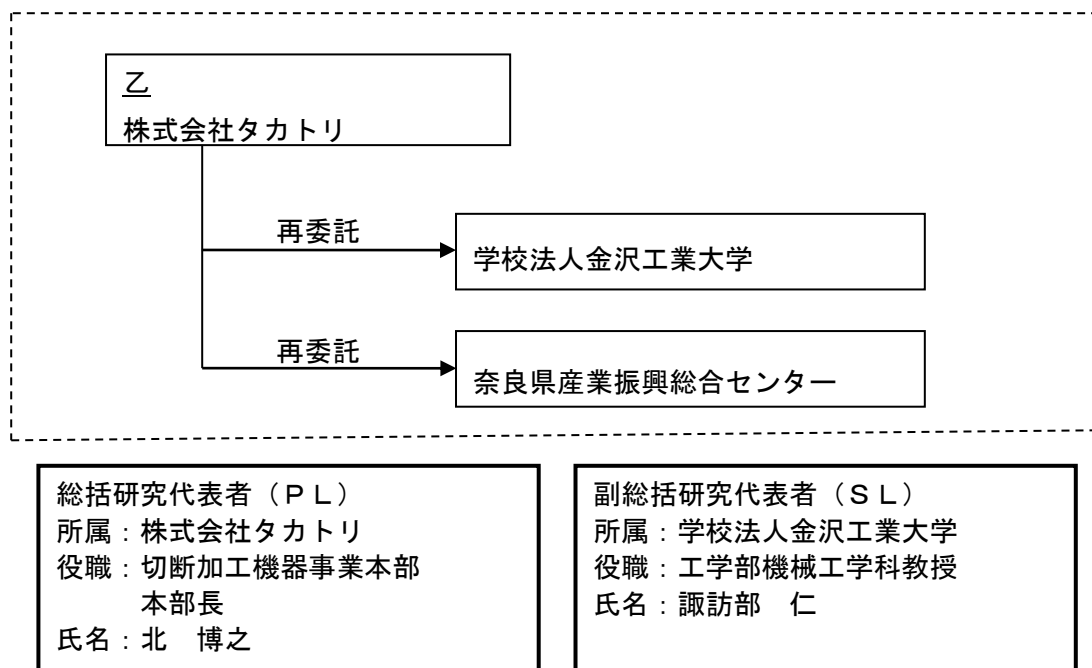
樹脂コーティングワイヤーを用いた加工技術の確立に向けて、平成25年度は、株式会社タカトリと金沢工業大学は、既存技術をベースとした実験機を用いてテストカットを行い、樹脂コーティングワイヤー加工で要求される課題を抽出し、装置開発に必要な要求事項を明確にする。また、奈良県産業振興総合センターは、樹脂コーティングワイヤーの破断試験により、断線メカニズムの解析に必要なデータの蓄積を行う。これらの要素研究を元に、平成25年度に試作機開発を行い、平成26年度に試作機を用いて、樹脂コーティングワイヤーを用いた鏡面スライシング加工技術を確立し、H27年度には量産機開発を行い、下記の最終目標を達成する計画である。

【研究開発の最終目標】

測定項目 (単位)	表面粗さ (Ra) μm	加工変質層 μm	反り μm	ワイヤー径 μm
現 状	0.5	15	30	120
目 標	0.1	3	15	100
達 成	0.1	0.06	17	120

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織



1-2-2 所在地

① 事業管理機関

- ・株式会社タカトリ本社
 〒634-8580 奈良県橿原市新堂町 313 番地 1 号
 最寄り駅：近畿日本鉄道南大阪線坊城駅

② 研究実施場所

- ・株式会社タカトリ本社 <再掲>
 〒634-8580 奈良県橿原市新堂町 313 番地 1 号
 最寄り駅：近畿日本鉄道南大阪線坊城駅
- ・学校法人金沢工業大学
 〒924-0838 石川県白山市八束穂 3 番地 1 号
 最寄り駅：JR 東日本鉄道北陸本線松任駅

・ 奈良県産業振興総合センター

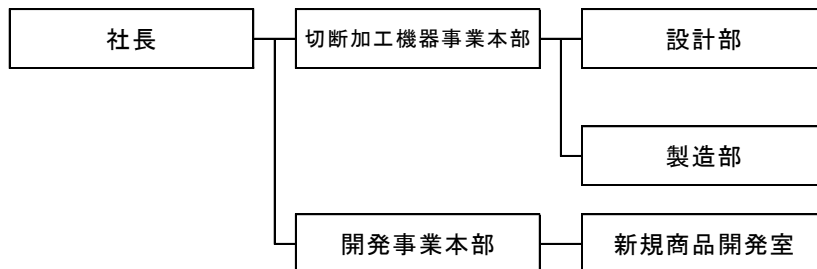
〒630-8031 奈良県奈良市柏木町 129 番地 1 号

最寄り駅：近畿日本鉄道橿原線西ノ京駅

1-2-3 管理体制

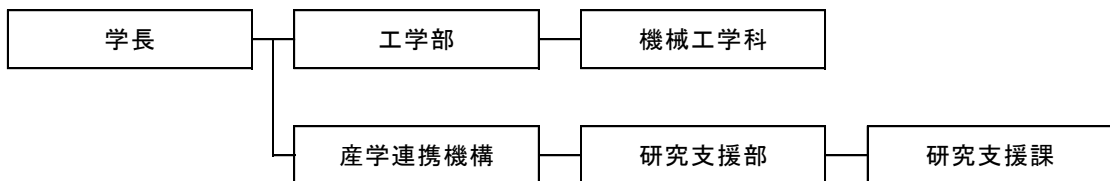
① 事業管理機関

[株式会社タカトリ]

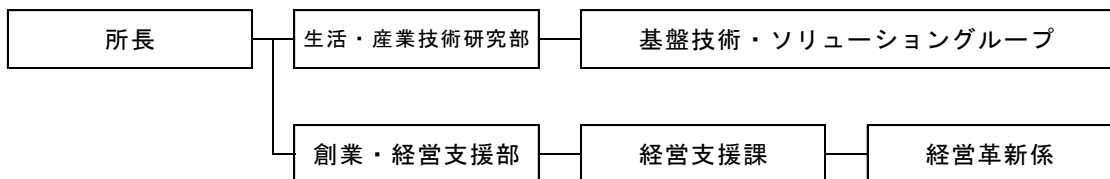


② (再委託先)

[学校法人金沢工業大学]



[奈良県産業振興総合センター]



1-2-4 管理員及び研究者

【事業管理機関】株式会社タカトリ

① 管理員

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
福光 秀之	新規商品開発室 副部長	【7】
中西 裕紀子	新規商品開発室	【7】

② 研究員

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
北 博之	切断加工機器事業本部 本部長	【1】【2】【4】【5】【6】
松田 祥伍	切断加工機器事業本部 主任	【1】【2】【4】【5】【6】
植村 奈保樹	切断加工機器事業本部	【1】【2】【4】【5】【6】
田井中 康志	切断加工機器事業本部	【1】【2】【4】【5】【6】

【再委託先】※研究員のみ

学校法人金沢工業大学

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
諏訪部 仁	工学部機械工学科教授	【1】【2】

奈良県産業振興総合センター

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
梅本 博一	生活・産業技術研究部 基盤技術・ソリューショングループ 主任研究員	【3】
赤井 亮太	生活・産業技術研究部 基盤技術・ソリューショングループ 主任研究員	【3】
高橋 幸嗣	生活・産業技術研究部 基盤技術・ソリューショングループ 主任主事	【3】

1-2-5 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

（事業管理機関）

株式会社タカトリ

（経理担当者）	新規商品開発室 副部長	福光 秀之
（業務管理者）	開発事業本部長	今井 孝則

（再委託先）

学校法人金沢工業大学

（経理担当者）	産学連携機構研究支援部研究支援課長	南 宏之
（業務管理者）	工学部機械工学科 教授	諏訪部 仁

奈良県産業振興総合センター

（経理担当者）	創業・経営支援部経営支援課 経営革新係長	上野 智子
（業務管理者）	生活・産業技術研究部 基盤技術・ソリューショングループ 統括主任研究員	三木 靖浩

1-2-6 その他
アドバイザー

機関名または氏名	所在地又は住所	代表者等	協力内容
株式会社コベルコ科研	〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5 TEL：078-992-3062	代表取締役社長 川田 豊 事業開発室主席部員 松原 智行	樹脂コーティングワイヤー（Rワイヤー）開発メーカー。 Rワイヤーに最適な装置仕様・要件についてのアドバイス。販売協力
加藤 智久	〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 TEL：029-861-5397	独立行政法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センターウエハプロセスチーム長 主任研究員	SiC 加工に関する研究開発動向についての最新情報の提供。 技術開発の方向性についてのアドバイス。

鏡面スライス加工技術委員会メンバー表

氏名	所属	部署・役職	備考
北 博之	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部長	PL
松田 祥伍	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部 主任	研究員
植村 奈保樹	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部	研究員
田井中 康志	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部	研究員
諏訪部 仁	金沢工業大学	工学部機械工学科教授	SL 業務管理者
三木 靖浩	奈良県産業振興総合センター	生活・産業技術研究部基盤技術・ソリューショングループ統括主任研究員	業務管理者
梅本 博一	奈良県産業振興総合センター	生活・産業技術研究部基盤技術・ソリューショングループ主任研究員	研究員
赤井 亮太	奈良県産業振興総合センター	生活・産業技術研究部基盤技術・ソリューショングループ主任研究員	研究員
高橋 幸嗣	奈良県産業振興総合センター	生活・産業技術研究部基盤技術・ソリューショングループ主任主事	研究員
加藤 智久	独立行政法人産業技術総合研究所	先進パワーエレクトロニクス研究センターウエハプロセスチーム長 主任研究員	アドバイザー
松原 智行	株式会社コベルコ科研	事業開発室主席部員	アドバイザー
今井 孝則	株式会社タカトリ	開発事業本部長	業務管理者
福光 秀之	株式会社タカトリ	新規商品開発室 副部長	管理員
中西 裕紀子	株式会社タカトリ	新規商品開発室	管理員
森田 昌宏	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部副本部長	
松尾 勝利	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部設計部課長	
米田 竜也	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部設計部課長	
赤阪 恭良	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部製造部長	
植松 豊	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部製造部次長	
土田 敏志	株式会社タカトリ	切断加工機器事業本部製造部課長	

1-3 成果概要

実施項目【1】 樹脂コーティングワイヤーに対応した加工条件の最適化

(学校法人金沢工業大学/株式会社タカトリ)

【1-1】従来機を用いたスライシング性能の評価

従来技術をベースとした自社製造の機械装置として実験機を製作し、加工条件の一つである揺動振動が、樹脂コーティングワイヤー加工に及ぼす影響について評価を行った。揺動振動の具体的な変動要素としては、揺動角度、揺動速度があるが、その他の加工条件の加工速度やワイヤー線速との組み合わせによって、加工品質に与える影響を明らかにした。

【1-2】従来機を用いた被加工材料別の性能評価

実験機を用いて、樹脂コーティングワイヤーによる太陽電池用シリコンとSiCの比較試験を行い、被加工材料の特性の違いによって、求められる加工条件の変化の検証を行った。

【1-3】試作機開発に必要な要求事項のまとめ

【1-1】【1-2】により、樹脂コーティングワイヤー加工における揺動技術および材料特性が、SiCスライシングに与える影響を明らかにした。これらの結果から、平成 26 年度に実施した試作機開発のフェーズにおいて、樹脂コーティングワイヤー対応機に求められる要求事項を抽出した。

実施項目【2】 樹脂コーティングワイヤーに対応した加工部材の最適化

(学校法人金沢工業大学/株式会社タカトリ)

【2-1】スラリーの最適化(種類、粒径、形状、濃度等)

砥粒径が加工に与える影響の試験として、砥粒径 2um とそれよりも小さい砥粒径 3um を比較した。従来の遊離砥粒方式や、固定砥粒方式では、砥粒径が小さくなると切断能力が低下するが、樹脂コーティングワイヤー方式の場合は、低下が見られないことがわかった。

【2-2】被加工物の基材および接着剤の最適化

当初、従来のSiCやサファイア加工で使用していた接着剤を用いて切断速度を上げてのテストを評価していた時にワークの脱落が発生した。基材との接着面は、オリフラ部分を使用するため、2インチの方が小さくなり、接着力が足らなくなることは推察できたが、従来の遊離加工方式や固定砥粒方式では起こらない現象であった。このことから、樹脂コーティングワイヤー加工は、従来方式よりも僅かにワイヤー走行方向への負荷が高いことがわかった。

そこで、接着剤メーカーに、接着力の高い接着剤を依頼し、現在、開発試作段階の非売品の提供を受け、試したところ、安定して加工できることが確認できた。なお、接着剤の接着力と扱い易さは、トレードオフの関係があり、接着力が高ければ、加工中のインゴットの脱落は防げるが、切断後の剥離が困難になることから、単に接着力の高いものを選択するのではなく、切断後の剥離性のことも考慮し、最適化を図る必要がある。

【2-3】被加工物の基材および接着剤の最適化

上記 2-2 では基材及び接着剤の最適化について説明したため、本節では 2-2 以外の部材として砥粒の形状について検討し、丸い形状の砥粒(アスペクト比が小さい砥粒)を用いるとウエハ表面のソーマークが改善されることを明らかにした。また、最適な組み合わせの抽出として、揺動角度、ワイヤーの往復走行時の反転時の影響について実験的に検討し、それらの結果を元に2インチ SiC インゴットの切断を行った。

実施項目【3】 樹脂コーティングワイヤーの断線メカニズムの解析

(奈良県産業振興総合センター)

【3-1】各種条件下での破断強度評価

平成 25 年度は、材料強度試験機を用いて樹脂コーティングワイヤーの引張試験を行い、破断強度についてのデータを蓄積した。また、ワイヤーのねじれが断線に及ぼす影響について検証を行った。

平成 26 年度は、平成 25 年度に蓄積したデータとタカトリ内で発生した断線の情報から、樹脂コーティングワイヤー加工における断線の要因について解析を行った。

その結果、断線率が高いのは、加工室内よりもワイヤーリールボックス内であることがわかった。

以下に、装置の部分別およびその他の断線発生要因を示す。

リールボックス内での断線要因 (特にプーリーの配置が 90 度になっている箇所)

- ① プーリーの壁を駆け上がることによって、ワイヤーが脱離することによる断線
- ② プーリーの壁とワイヤーがこすれることで発生するワイヤーのねじれによる断線
- ③ プーリーが摩耗した場合に、深溝から抜け出せなくなることによる断線

加工室内での断線要因

- ④ ワークローラー間に張力の差が発生して断線
- ⑤ ワークローラーに加工されている溝にワイヤーが重複して巻かれることによる断線
- ⑥ ワークローラーへの異物の巻き込みによる断線

その他の断線要因

- ⑦ ワイヤー供給量が少ない場合に発生するワイヤーのねじれ
- ⑧ テンションプーリーやトラバースプーリーなどの駆動部
- ⑨ プーリーのイナーシャによるもの

以上の要因に基づき、ワイヤー断線の特性要因図を作成した。

【3-2】ワイヤー破断面解析

平成 25 年度は、【3-1】の各条件下で破断試験をした樹脂コーティングワイヤーの破断面観察を実施し、データを蓄積した。

平成 26 年度は、平成 25 年度に引き続き、ワイヤーの引張試験を行い、試験後の破断面の観察データを蓄積し、破断面から破断原因が特定できないかどうかについて検証した。今年度は、次項で述べる疲労試験後に破断させたサンプルを加え、破断面の観察を行った。

【3-3】限界使用条件の評価

平成 26 年度は、疲労試験機を用いて樹脂コーティングワイヤーの稼働時における平均張力や張力のばらつきに関する限界使用条件について検討した。実施した疲労試験範囲において、ワイヤーの破断や破断荷重の低下がないことがわかった。(単純引張試験での樹脂コーティングワイヤーの破断荷重は 38N 程度)

【3-4】ワイヤー断線についての実機評価・検証

平成 26 年度は、プーリーの摩耗がワイヤー断線の要因であることを検証するため、ワイヤー走行後(100 時間運転)のプーリーの摩耗量を測定した。その結果、プーリーの摩耗量は計測できなかったが、同測定の過程でプーリー外形の膨張がみられた。そのためワイヤー走行の時間を増やして(200 時間)プーリーを計測した。その結果、プーリーの内径とプーリー軸の間に 1 mm 程度の間隙ができるほどの膨張が発生した。プーリーと軸の間に緩みがあると、プーリーの挙動が不安定になり、偏摩耗や不要な振動を発生させ、ワイヤー断線の原因になる。

ウレタン製のプーリーが膨張する原因として、油分や水分による体積変化、永久ひずみによる変化が考えられる。前者としては、スラリーが影響している可能性が考えられることから、プーリーをスラリーに浸し、24 時間おきに測定する実験を行った。また、プーリーメーカーに当現象について見解を求めている。

実施項目【4】 試作機の開発

(株式会社タカトリ)

樹脂コーティングワイヤー加工において要求される装置に起因する加工条件を検討した結果を元に、要求事項の実機による検証を行いながら、当初計画より前倒して従来機をベースとした試作機的设计・製造を行った。当試作機により最大線速 1000m/m での4インチのテストカットが可能となった。

計画を前倒した理由は、樹脂コーティングワイヤー加工時に装置への要求仕様で、従来機と比較して最も影響が大きいのは線速であることが明確であったことと、逆に線速の遅い装置でのテストカットで得られる結果では、量産機の要求仕様を明確にすることができないと考えたためである。

実施項目【5】 試作機の評価と新技術の効果の確認

(株式会社タカトリ)

【5-1】試作機の剛性、スラリー流路、温度の計測

装置剛性最適化のために、ひずみゲージおよび加速度計等による計測や加工液の流路最

適化を図るための計測、高線速化によって発生する装置駆動部の発熱やスライシングによる発熱の定量的計測を行った。装置内の発熱による効率の低下や冷却機能最適化を検討した。得られた結果は改造検討にフィードバックする。

【5-2】試作機を用いた鏡面スライス加工技術の評価テスト

【1-1】に切断したウエハの反りの結果から切り始めと切り終わり部でウエハの形状が大きく変化していることがわかった。そこで試作機のテストを進めるにあたっては切り始めと切り終わり部の反りの改善を目的としたテストを実施した。

【5-3】量産機開発に必要な要求事項のまとめ

【5-2】により得られた結果より、量産機開発に求められる要求事項を明らかにした。これらの要求事項を平成27年度に開発する量産機に反映していく予定としている。

実施項目【6】 量産機の開発

(株式会社タカトリ)

【6-1】試作機を用いた評価結果のフィードバック設計

【6-2】量産機的设计・製造

【1-1】のテスト結果からワイヤー線速を上昇させると加工時のワイヤーのたわみ量が減少し、表面うねりの精度が向上することが確認できた。そこで量産機ではモーター容量をアップし、2000m/min まで出せるように開発を進めた。

また【5-1】で得られた知見についても装置に反映させて、量産機(MWS-612DNX 遊離仕様)の開発を行った。

【6-3】量産機を用いた鏡面スライス加工技術の評価テスト

実験機の最高線速が 1300m/min であったことから、それ以上の線速を上げることに對する優位性は確認できていなかった。そこで量産機を用いて線速 1500m/min と 2000m/min でテストを実施した。

線速 1500m/min と 2000m/min で比較したところ、後者の切断精度の方が優れていたことから線速 2000m/min においても切断精度向上の可能性があることがわかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社タカトリ 新規商品開発室 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

第2章 本論

2-1 緒論

S i Cは、高耐圧、低損失などの優れた電気特性から、次世代パワー半導体や超高耐圧半導体素子、高輝度LEDの基板材料としてニーズが高まっているが、ウエハコストが高く、普及のネックとなっている。コスト高の要因は、結晶製造が難しく、高価な材料であると同時に、高硬度難加工材料であることから、従来の遊離砥粒加工方式や固定砥粒加工方式では、加工時間が長く材料ロスが大きくなることが上げられる。

こうした課題の解決策として、樹脂コーティングワイヤーを用いた鏡面スライシング加工により、単に面精度が向上するというだけでなく、加工変質層の低減、ウエハの薄厚化が可能になると期待されているが、現在、実用化には至っていない。

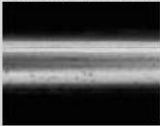
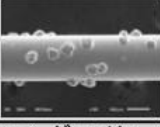
本研究では、樹脂コーティングワイヤーを用いたS i Cウエハの鏡面スライシング加工技術を確立し、薄厚化による材料ロスの低減、後工程の加工時間を短縮することにより、大幅なウエハ価格のコストダウンを目指す。

平成 25 年度は、株式会社タカトリと金沢工業大学は、既存技術をベースとした実験機を用いてテストカットを行い、樹脂コーティングワイヤー加工で要求される課題を抽出し、装置開発に必要な要求事項を明確にする。また、奈良県産業振興総合センターは、樹脂コーティングワイヤーの破断試験により、断線メカニズムの解析に必要なデータの蓄積を行う。

これらの要素研究を元に、平成 25 年度に試作機開発を行い、平成 26 年度に試作機を用いて、樹脂コーティングワイヤーを用いた鏡面スライシング加工技術を確立し、H27 年度には量産機開発を行い、下記の最終目標を達成する。

2-2 樹脂コーティングワイヤー加工の特徴

樹脂コーティングワイヤー加工の特徴は、従来加工方式に比べ、少ないカーフロスやワークへのダメージ低減などがあげられる。従来加工方式であるピアノ線加工、ダイヤモンドワイヤー加工と新しい加工方式である樹脂コーティングワイヤー加工のメリット、デメリットは以下の通りである。

項目	メリット	デメリット
ピアノ線(遊離砥粒) 	・カーフロスが少なくできる ・ワークへのダメージが小 ・遊離ダイヤによるラップ加工 ・低価格 ・面粗さでは有利	・切断時間が長い ・作業負担大きい ・環境負荷が大きい ・スラリーの濃度管理が必要 ・ワイヤーが細る(厚みばらつき大) ・ダイヤモンド砥粒の使用量が多い
ダイヤワイヤー(固定砥粒) 	・切断時間が大幅に短縮 ・固定ダイヤによる切削加工 ・加工精度(反り等)を改善しやすい ・作業負担が小さい ・環境負荷が小さい ・ワイヤーが細らない(厚みばらつき小)	・カーフロスが多い ・ソーマークなど面粗さでは不利 ・加工変質層が深い ・切削加工によるクラックの発生 ・ワイヤーコストが大きい
樹脂コーティングワイヤー(遊離砥粒) 	・カーフロスが少なくできる ・ワークへのダメージが極小 ・半固定ダイヤによる加工 ・表面鏡面加工が可能 ・研磨工程の時間短縮 ・ダイヤモンドワイヤー<加工時間<遊離 ・ワイヤーが細らない(厚みばらつき小) ・ダイヤモンド砥粒の使用量の低減	・ワイヤーコストが高い ・加工時間>ダイヤモンドワイヤー ・作業負担が大きい ・環境負荷が大きい ・スラリーの濃度管理が必要 ・樹脂コート(5um)の剥がれの恐れ

2-3 実施内容

【1】-1 樹脂コーティングワイヤーに対応した加工条件の最適化 (株式会社タカトリ)

【1-1】-1 従来機を用いたスライシング性能の評価

我々は、樹脂コーティングワイヤーを使用した際に、揺動振動がスライシング加工に与える影響を従来機および実験機で検証した。実験機とは、従来技術を元に製作された装置である（図1-3参照）。揺動振動に着目した理由は、ワークとワイヤーの間にスラリを確実に送り込むことが、樹脂コーティングワイヤーでのスライシング加工において重要だと考えたからである。タカトリ製マルチワイヤーソーの特徴である揺動振動が、遊離砥粒を用いたスライシング加工において、ワークとワイヤーの間に効率的にスラリを送り込めることがわかっている。切断精度に影響を与える具体的な因子は、揺動角度、揺動速度などであり、その他（切断速度やワイヤー線速）との最適な組み合わせによって加工品質の向上を図る。

従来機でのスライシングテストは、実験計画法を用いた。理由は、SiCのスライシング加工に影響を与える可能性のある因子が多いこと、また対象とする加工物(SiC)が非常に高価な材料であることに起因する。また、実験計画法は過去のスライシングノウハウの検証も含めて広範囲のテストが実施可能であり、直行配列表実験は有効な方法であると考えたためである。直行配列表実験を進めるにあたり、基本的な概念を図1-1に、直交させた実験と直交していない実験の比較まとめたものを表1-1に示す。

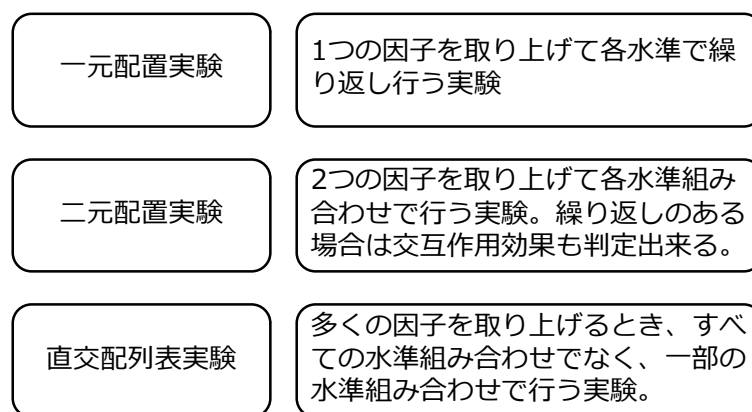


図1-1. 直交配列表実験の概念図

表 1-1. 直交させた実験と直交していない実験の比較

	実験のやりやすさ (比較)	実験結果の再現性 (比較)
直交させた実験(多元配置法)	水準変更が多く、めんどろ	再現性が高い
直交していない実験	水準変更が少なく、簡単	再現性が低い

(1) 直交配列実験について

直交とは、数学のベクトル単元で出てくる、二つのベクトルが直角に交わることを示している。つまり、二つのベクトル(ベクトル A、ベクトル B)が直角に交われれば、A に対する B の射影も、B の A に対する射影もゼロになるため、A と B は独立した存在となる。用語で表現すると内積がゼロという状態である。これは、三次元さらには多次元でも同じ概念である。このことが直交配列表の根本的な、概念となり重要な考えである。

直交実験のねらいは実験結果の再現性を高めることである。直行していない実験の場合、「因子 A は A_1 という水準がよい」という結論を得ても、ほかの因子が B_1 、 C_1 、 D_1 の時だけの結論である。仮に因子 B を B_2 に変えると、 A_1 という水準は A_2 に比べて悪い水準かもしれない。それらは、因子 B、因子 C、因子 D それぞれについていえることである。つまり、直行していない実験の結果は、「わかりようがない」ことの積上げの上に立っているため、再現性が低く、また因子に関する情報の欠如により技術の蓄積が低いといえる。

これに比べ、直行させた実験の場合、A という因子の水準の優劣を評価するのに、他のすべての因子を振って、平均値の変化(主効果)を見ている。そして、こうした実験から A_1 と A_2 では A_1 (または A_2) の方がよいという結論を出すことが、再現性を高めると同時に因子に関する情報の蓄積につながると考えられる。

直行表を使った実験のメリットについては以下のような項目も挙げられる。

- ①下流で再現する要因効果を提供する。
- ②外側に誤差因子をとって SN 比を作らなくても、制御因子のみで、ある程度安定性のある最適条件が求まる。
- ③直行表を使った実験では、すべての実験が終わってから結論がわかるので、研究を途中で止めることがない。結果として、よりよい最適条件、より多くの因子に関する情報を入手できる。
- ④多くの因子の研究を並行して行うので、実験の検討や準備が 1 回で済み、結果として、研究機関が短縮できる。
- ⑤すべての実験が終わるまで結果が見えないため、自然に実験を急ぐようになり、研究期間が短縮する。
- ⑥制御因子をたくさん取り上げるので、実験中の調整が困難となり、自然に安定性の研究を行うようになる。

(2) 直交配列表を用いた実験

① インゴット外観

まず、対象物とした SiC インゴットは 3 インチである。実際にスライシング加工したインゴットの外見図を以下の図 1-2 に、SiC インゴットの仕様を表 1-2 に示す。

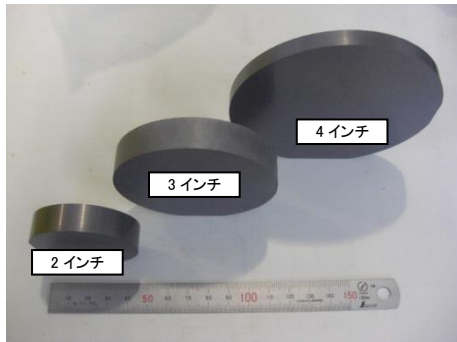


図 1-2. SiC インゴットの外見図

表 1-2. SiC インゴットの仕様

インチ	直径(mm)	厚み(mm)
2	50	10-15
3	75	10-15
4	100	5-10

② 装置外観図

従来機と実験機の外観写真を図 1-3 に示す。この 2 種類の装置にて実験を行っている。



図 1-3. 実験に使用した装置の外観

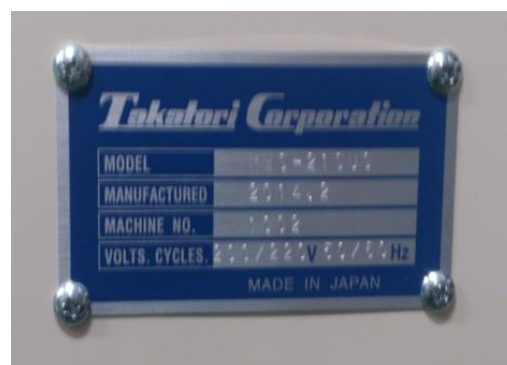
なお、実施項目「【1】-1 樹脂コーティングワイヤーに対応した加工条件の最適化」における実験において、株式会社タカトリは、自社製造の機械装置として実験機（Model：MWS-21）を製作し行った。装置詳細写真を図 1-4 に示す。



前面



側面



実験機の設置場所

図 1-4. 自社製造の機械装置 実験機 Model：MWS-21

③ 実験条件

直交配列実験を行うにあたり各インチで設定した因子および水準に関して説明する。

[3 インチテスト]

表1-3は3インチのスライシングテストをするために設定した因子および水準の表である。

因子としては、ワークローラーの溝角度、加工液の砥粒濃度、揺動角度、揺動速度、加工液温度、ワイヤーの新線供給量、切断速度、サイクル、ワイヤー線速、ワイヤー張力を設定し、直交表はL18を用いた。

本テストでは、ウエハの切断精度・切断時間の短縮・加工中の断線リスク等などワイヤソーでのスライシング加工においてユーザーからの要望が多い項目を評価対象としてテストを実施した。

表 1-3. 3 インチインゴットの L18 直交表

制御因子		水準1	水準2	水準3
項目	単位			
溝角度	deg	90	50	
砥粒濃度	g/L	40	50	60
揺動角度	deg	0.5	1	1.5
揺動速度	deg/min	100	150	200
加工液温度	℃	20	22.5	25
供給量	m	2800	5600	8400
切削速度	mm/h	2	4	6
サイクル ^(100%/一定)	sec	2/11	2/26	2/56
線速	m/min	700		
張力	N	20		

④ スライシング加工における Peak-valley の結果

現段階で知り得た、スライシング加工における Peak-valley の値(以下 PV 値)の結果について述べる。この結果は、FT-330(黒田精工)によって測定されたものである。現段階で、問題となっているのは図 1-5 および図 1-6 に示すように、インゴットに入る部分と切断の終わりの部分でウエハの形状が大きく変化することである。

インゴットへの入口と出口の加工条件をコントロールすることによって、精度の向上が期待されることから、切り始めと切り終わりのテーブル速度の可変が効果を示すのではないかと考えている。

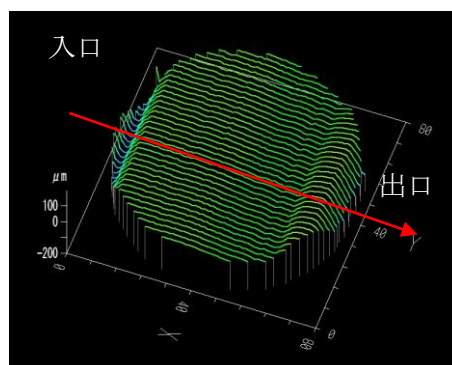


図 1-5. ウエハの PV 値を示す 3D

[3 インチでの現時点の成果]

13 時間 35 分で切断→PV 値 Ave. 101um

テスト内での PV 値の最高 →Ave. 52um

現時点で、13 時間半で断線することなく切断出来ることが分かった。また、3 インチのウエハを Ave. 52um で切断出来る条件が分かった。



図 1-6. ウエハの PV 値の断面図

⑤ 実験結果

1) 加工液の砥粒濃度と切断精度の関係

加工液の砥粒濃度と切断精度の関係を図1-7に示す。水準としては、1Lの加工液の中に3.5wt%、4.4wt%、5.3wt%の水準でダイヤモンド砥粒を懸濁させた。結果として切断精度は砥粒濃度が高いほど精度よく切断が出来る結果となった。これは、加工液の砥粒が一定以上存在しないと良好な切断結果が得られないことを示している。その一方で、装置内での砥粒たまりの結果(【5-1】参照)から、装置内にたまる砥粒のことを考慮すると実際にはさらに低濃度であることも予想される。このことから、より低濃度で切削するには装置内の砥粒たまりが切断精度に大きく影響すると考えられるため、それを低減することで結果は良化する可能性がある。

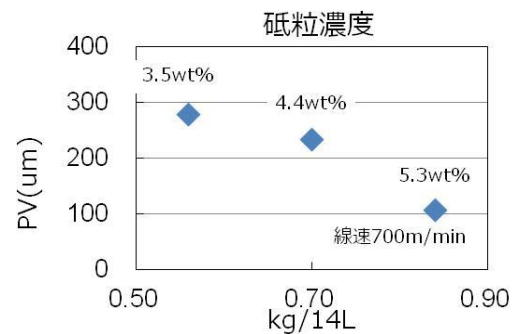


図1-7. 砥粒濃度と切断精度の関係

2) ワイヤーの新線供給量と切断精度の関係

ワイヤーの新線供給量と加工精度の関係を図1-8に示す。水準としては2800m、5600m、8400mの3水準とした。結果として、新線供給量が多い場合には切断精度が悪化する傾向にあることがわかった。理由として、新線が必要以上に供給されることでワイヤーに対する砥粒の食いつき(埋め込み)量が少なくなってしまう、切断性が低下した結果だと考えている。実際のワイヤーの表面状態を確認出来ていないが上記のようなことが理由とされている。

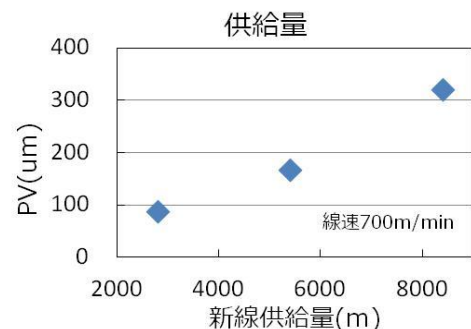


図1-8. 新線供給量と切断精度の関係

2) 加工液温度と切断精度の関係

加工液温度と切断精度の関係を図1-9に示す。水準は20℃、22.5℃、25℃の3水準とした。結果として、温度が高いほど切断精度が良好という結果になった。温度が一定であれば設定温度差による加工物の膨張が発生したことによる精度変化とは考えにくい。そこで、今回の結果になった理由として、試作機評

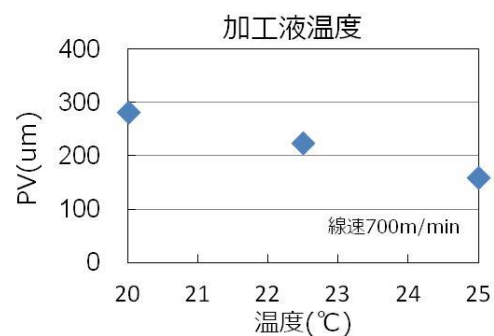


図1-9. 加工液温度と切断精度の関係

価でも少し述べたが設定温度との変化が少ないため 25℃設定が良好になったと考えている。この仮説が真であれば、装置内温度の管理を徹底する必要がある。

3) 切断速度と切断精度の関係

切断速度と切断精度の関係を図 1-10 に示す。水準は 2mm/h、4mm/h、6mm/h の 3 水準とした。切断速度を上げると切断精度が悪化した。しかし、その変化は他の因子と比較して大きくないことがわかる。このことから、高速切断に向けて可能性を残した。

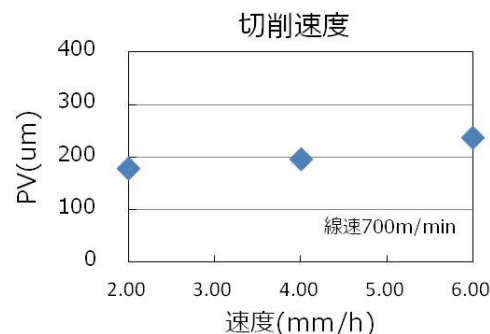


図 1-10. 切断速度と切断精度の関係

4) 揺動速度と切断精度の関係

揺動速度と切断精度の関係を図 1-11 に示す。水準は 100deg/min、150deg/min、200deg/min の 3 水準とした。特徴は 150deg/min が最も低い値になったことである。揺動角度を 0.5deg、1deg、1.5deg とふったにも関わらず 150deg が精度良く切れる結果となった。このことから揺動速度に関してはこの範囲内では影響が少ないと考えている。

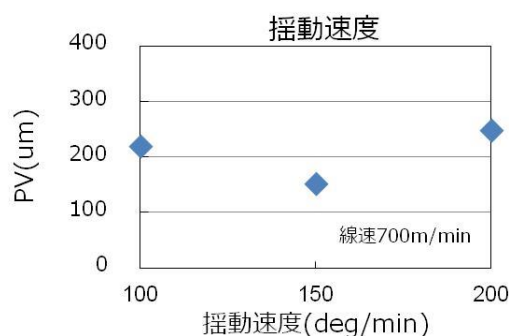


図 1-11. 揺動速度と切断精度の関係

5) 揺動角度と切断精度の関係

揺動角度と切断精度の関係を図 1-12 に示す。水準は 0.5deg、1deg、1.5deg の 3 水準とした。結果として、0.5deg の結果がもっとも良かった。この結果から揺動角度と切断精度には因果関係があるのではないかと考えている。角度が精度に影響していると考え理由として、加工液の切断部への入り込み量が角度によって大きく変わるからだ考える。たとえば、揺動角が大きいと引き込む際に、空気も一緒に抱き込み切断能力が低下するといった現象が起これと考える。つまり、空気を巻き込むことで切断部に負荷がかかり、ワイヤーの切断方向への直進性が低下し、切断精度の悪化につながったと想定する。これに関しては今後検証が必要になると考える。

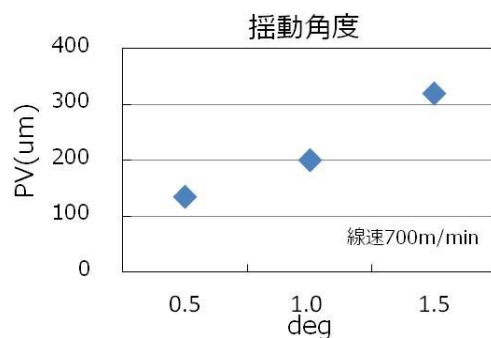


図 1-12. 揺動角度と切断精度の関係

6) サイクルパターンと切断精度の関係

サイクルパターンと切断精度の関係を図 1-13 に示す。ワイヤーソーではワイヤーを往復走行させて加工物を切断することが標準であり、その往復走行 1 回分を 1 サイクルと呼んでいる。1 サイクルの構成要素として設定速度に要する加速時間、設定速度を維持する一定速時間、復路走行させるための減速時間がある。図 13 で 2/11 と表記されている場合は、1

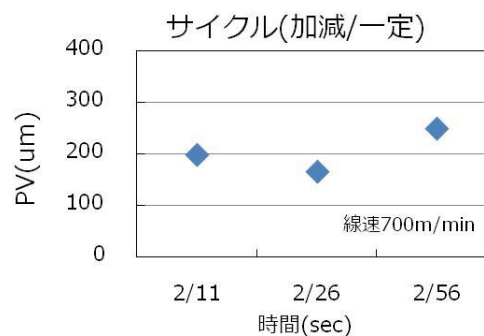


図 1-13. サイクル数と切断精度の関係

サイクル 30 秒、2/26 と表記されている場合は 1 サイクル 60 秒、2/56 と表記されている場合は 1 サイクル 120 秒となる。水準としては加減速の時間を 2 秒とし、一定速の時間を 11 秒、26 秒、56 秒とした。今回の結果として、一定速の時間を 26 秒に設定した条件が最も良好であった。ただし、11 秒設定と大きな違いがみられないことから、一定速時間が 26 秒より大きくなると切断精度が悪化するとも考えられる。

今回の評価結果から、3 インチの SiC インゴットの切断における各種切断因子の影響を把握出来たと考えている。この傾向は、インゴットの大きさによって変化があることは想定されるが、基本的に大きく変化するという事はないと考えている。そのことから、この 3 インチでの結果を 4 インチの切断に展開していくことを考えている。

【1-3】-1 試作機開発に必要な要求事項のまとめ

【1-1】-1 で得られた結果より、樹脂コーティングワイヤー対応機に求められる性能事項を以下に述べる。

- ① 単位時間あたりのサイクル数(高サイクル)が多い条件の方が PV 値が良化する傾向にあるため、高サイクルでの安定性が装置には求められる。
- ② 砥粒濃度が PV 値に影響を及ぼすことがわかった。
特に濃度が濃いほど良化する傾向にある。このことから、砥粒が装置の中で効率よく循環することが求められる。

【1】－2 樹脂コーティングワイヤーに対応した加工条件の最適化

(学校法人金沢工業大学)

【1－1】－2 従来機を用いたスライシング性能の評価 (SiC の加工特性)

① 切断速度がウエハ表面性状に与える影響 (樹脂厚 $t: 5\mu\text{m}$)

マルチワイヤーソーに揺動振動を付加し、切断速度を変えて SiC を加工した際の加工特性についてワイヤー走行方向並びに切断方向に対してそれぞれ検討した結果を図 1-14 に示す。同図(a)はウエハ表面粗さの挙動、同図(b)はウエハ表面うねりの挙動である。同図(a)より、算術平均粗さに関しては、ワイヤー走行方向、切断方向共に切断速度の影響は小さいことが分かる。また、同図(b)より、表面うねりに関しては、ワイヤー走行方向と切断方向の双方で切断速度の上昇に伴って表面うねりが悪くなっていくことが分かる。

図 1-15 に切断速度と加工能率の関係を示す。同図より、切断速度が 0.08mm/min の時の加工能率が 0.75mm/min 程度となっているのに対し、切断速度が 0.12mm/min の時の加工能率は 0.10mm/min 程度となっていることが分かる。よって、切断速度 0.12mm/min の条件では 0.08mm/min のときに比べて、ワイヤーのたわみ量が増加したため、表

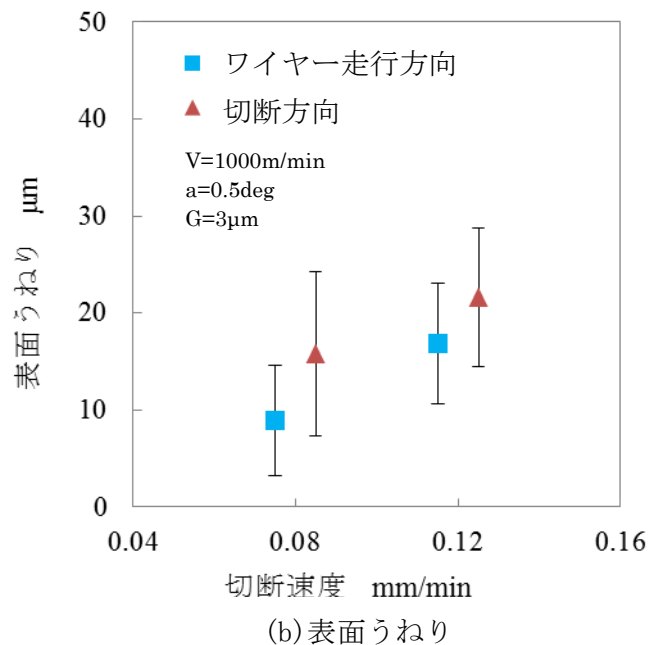
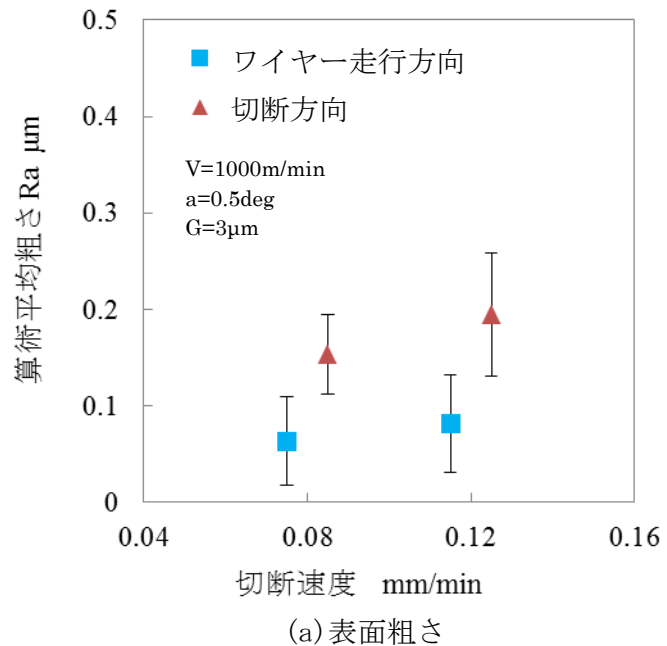


図 1-14. 切断速度とウエハ表面性状

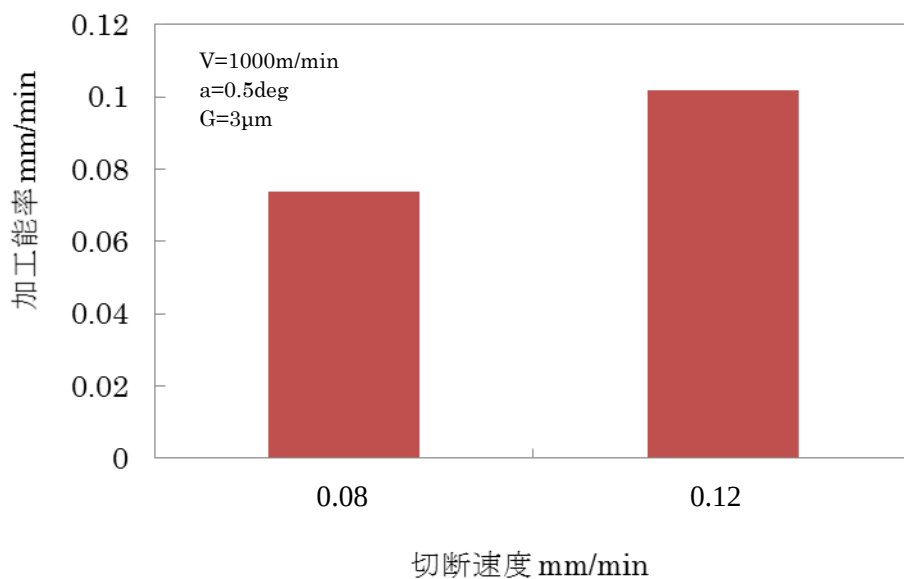


図 1-15. 切断速度と加工能率

面うねりが悪化したものと考えられる。しかしながら、本実験で用いた揺動型のマルチワイヤーソーでは、切断速度 0.12mm/min のときの表面うねりの平均値が最大で $20\mu\text{m}$ 以下となっているため、十分切断可能であることが確認できた。

図 1-16 に本加工における切りくずの SEM 観察写真を示す。同図より、切りくず形状は細長く、せん断型の切りくずが得られていることが分かる。また、図 1-17 にウエハ表面の観察写真を示す。同図より、シリコンを加工した場合⁸⁾と同様に加工表面が鏡面になっていることが分かる。以上より、本加工では延性モード加工が行われていたものと考えられる。

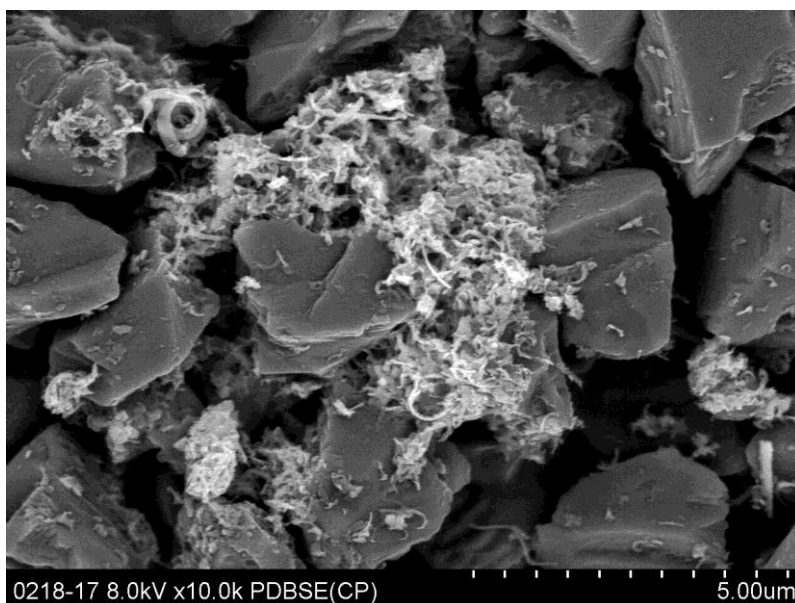


図 1-16. 切りくず SEM 写真



図 1-17. ウエハ表面の観察写真

図 1-18 に各条件におけるウエハ表面写真を示す。同図(a)は切断速度が 0.08mm/min の写真、同図(b)は切断速度が 0.12mm/min の写真である。同図(a)より、ウエハ表面に多数のスクラッチ痕が均一に生じていることが分かる。また、同図(b)より、切断速度 0.12mm/min のウエハ表面にはスクラッチ痕が少ないことが分かる。以上のウエハの観察写真からスクラッチ痕の数やその間隔は切断速度によって変化することが明らかとなった。しかし、本実験で使用した砥粒は $2\sim3\mu\text{m}$ と非常に小さく、表面粗さは砥粒径に依存すると考えられるため、切断速度の影響が小さかったものと考えられる。



(a) 切断速度 0.08mm/min



(b) 切断速度 0.12mm/min

図 1-18. ウエハ表面の観察写真

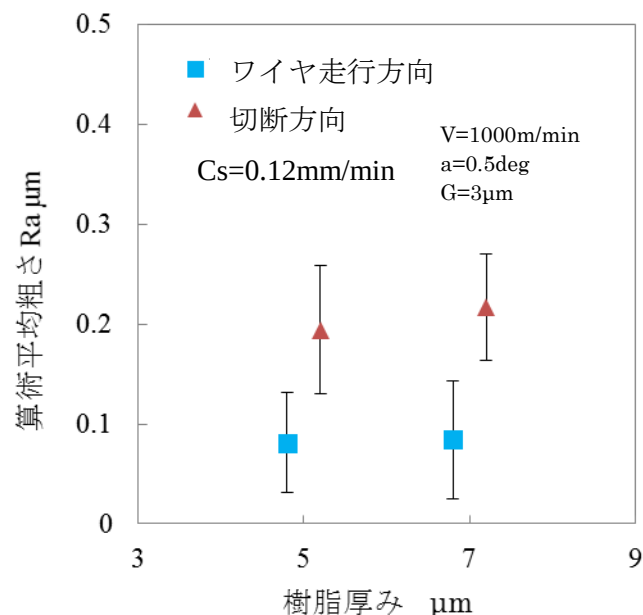
② 樹脂厚みがウエハ表面性状に与える影響

揺動運動を付加して SiC 材料のスライシング加工を行い、樹脂コーティングワイヤーの樹脂厚みがウエハ表面性状に及ぼす影響を検討した。

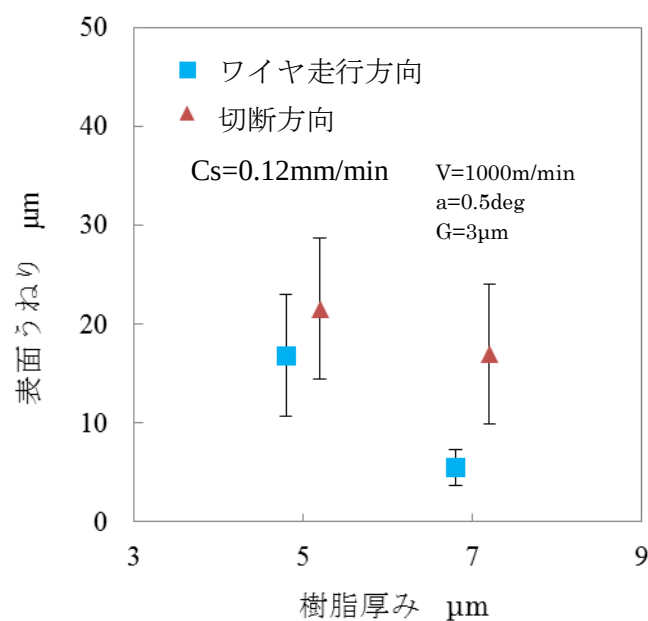
図 1-19 に切断速度 $C_s=0.12\text{mm/min}$ においてワイヤーの樹脂厚みを変化させた際の加工特性を示す。同図(a)はウエハ表面粗さの挙動、同図(b)はウエハ表面うねりの挙動である。同図(a)より、ワイヤー走行方向と切断方向共に樹脂厚みの違いが算術平均粗さに及ぼす影響は小さいことが分かる。また、同図(b)より、ワイヤー

の樹脂厚みが $7\mu\text{m}$ の方が切断方向の表面うねりが向上していることが分かる。

図 1-20 に樹脂厚みが異なるワイヤー工具の加工後の観察写真を示す。同図では、加工によってワイヤー工具表面に生じた砥粒の埋没痕を枠線で囲んである。同図(a)は樹脂厚みが $5\mu\text{m}$ の写真、同図(b)は樹脂厚みが $7\mu\text{m}$ の写真である。同図(a)より、埋没痕は 3 箇所と少なく、その分布には偏りがあることが分かる。また、同図(b)より、埋没痕は 6 箇所確認でき、その分布は均一であることが分かる。本加工方式では、ワイヤー表面にコーティングされている樹脂にダイヤモンド砥粒が加工中に埋め込まれることによって加工がされている。よって、ワイヤーの樹脂厚みが厚くなることでワイヤー被膜部分の樹脂のクッション性が向上し、砥粒の保持性が高くなったため、表面うねりが向上したと考えられる。



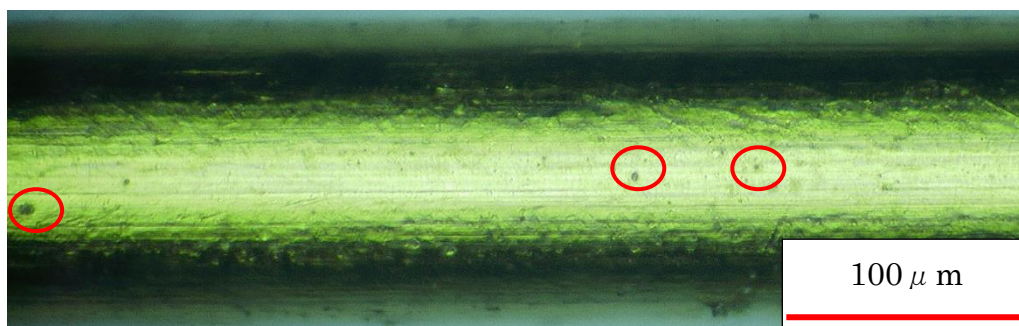
(a) 算術平均粗さ



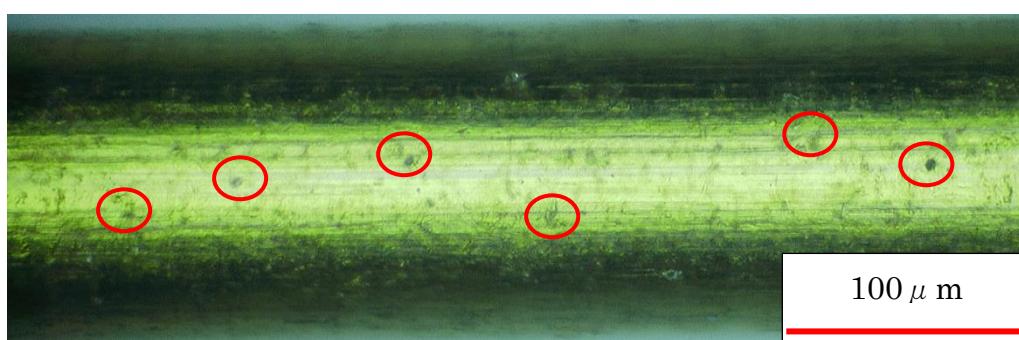
(b) 表面うねり

図 1-19. 樹脂厚みと加工特性

図 1-21 に各条件におけるウエハ表面写真を示す。同図(a)は樹脂厚みが $5\mu\text{m}$ の写真、同



(a) $5\mu\text{m}$



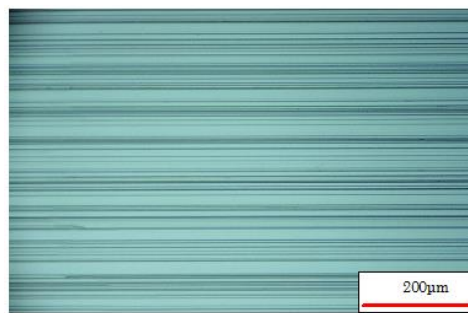
(a) $7\mu\text{m}$

図 1-20. 加工後のワイヤー観察写真

図(b)は樹脂厚みが $7\mu\text{m}$ の写真である。同図(a)より、ウエハ表面に生じたスクラッチ痕は少ないことが分かる。また、同図(b)より、樹脂厚み $7\mu\text{m}$ のウエハ表面にはスクラッチ痕が均一に生じていることが分かる。以上のウエハの観察写真からスクラッチ痕の数やその間隔は樹脂コーティングワイヤーの樹脂厚みによって変化することが明らかとなった。しかし、本実験で使用した砥粒は $2\sim3\mu\text{m}$ と非常に小さく、表面粗さは砥粒径に依存すると考えられるため、樹脂厚みの影響が小さかったものと考えられる。



(a) 樹脂厚み $5\mu\text{m}$



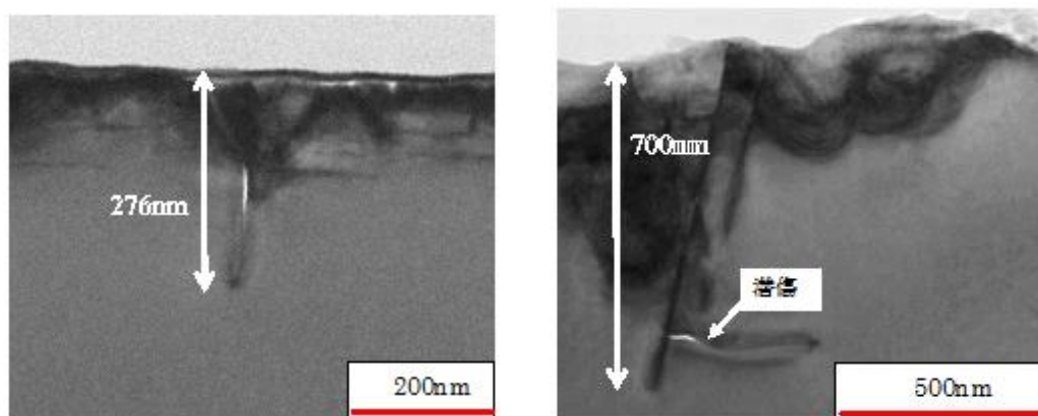
(b) 樹脂厚み $7\mu\text{m}$

図 1-21. ウエハ表面の観察写真

③ 加工変質層の挙動

図 1-22 に本報告で用いた樹脂コーティングワイヤー方式とダイヤモンドワイヤー工具を用いた固定砥粒方式で切断した際のウエハ切断面の TEM 観察写真を示す。同図(a)は遊離砥粒方式の写真、同図(b)は固定砥粒方式の写真である。同図(a)より、遊離砥粒方式では加工変質層が 276nm あることが分かる。また、同図(b)より、固定砥粒方式では加工変質層が 700nm あることがわかる。さらに、固定砥粒方式で加工したウエハには潜傷が観察されたが、樹脂コーティングワイヤー方式においては、潜傷は全く観察されなかった。

以上の結果より、樹脂コーティングワイヤー方式の方が加工面へ与えるダメージの点で、固定砥粒方式よりも優れていることが明らかとなった。



(a) 樹脂コーティングワイヤー

(b) ダイヤモンドワイヤー

図 1-22. 加工変質層の観察写真

【1-2】-2 従来機を用いた被加工材料別の性能評価

① 揺動角度がウエハ表面性状に与える影響（揺動速度一定）

揺動運動を付加してシリコンのスライシング加工を行い、揺動角度がウエハ表面性状に及ぼす影響を検討した。図 1-23 に揺動速度を一定 ($s=170\text{deg/min}$) として揺動角度を変化させた際の算術平均粗さ(切断方向)の挙動を示す。切断方向では無振動時の表面粗さが最も悪く、揺動運動を付加することで表面粗さが良くな

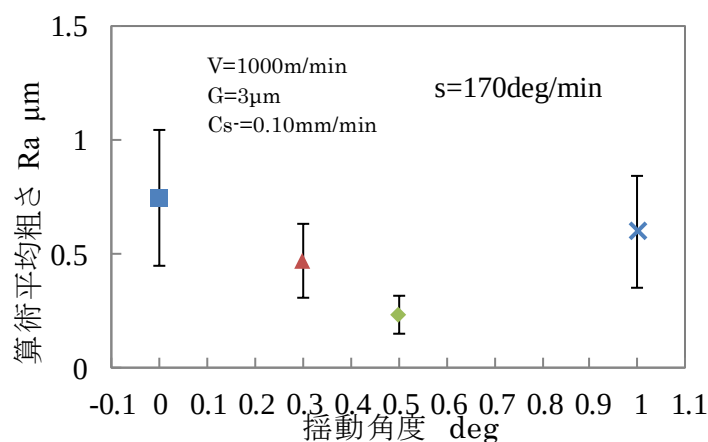


図 1-23 揺動角度と算術平均粗さの関係

っていることが分かる。また、揺動角度が 0.3deg から 0.5deg になることで表面粗さの向上が見られるが、1deg になると無振動時と同程度まで表面粗さが悪化していることが分かる。次に、図 1-24 に表面うねり（切断方向）の挙動を示す。算術平均粗さと同様、切断方向では揺動角度 0.5deg が最も良く、この値から離れるにつれて表面うねりが悪化することが分かる。

揺動速度一定条件下では揺動角度が小さくなると揺動振動数が大きくなり、揺動運動によって単位時間当たりにワイヤーが被削材を擦る回数が増加する。よって、揺動角度が 0.3deg の条件下では算術平均粗さおよび表面うねりが悪化したものと考えられる。一方、揺動角度が大きくなると、加工部に空気が流入し、表面性状が悪化するものと考えられる。よって、揺動角度 1deg の条件下では、算術平均粗さおよび表面うねりが悪化したものと考えられる。

② 揺動角度がウエハ表面性状に与える影響（揺動振動数一定）

前述の実験では揺動速度を一定として揺動角度を変化させているため、揺動角度の変化に伴って揺動振動数も変化する。

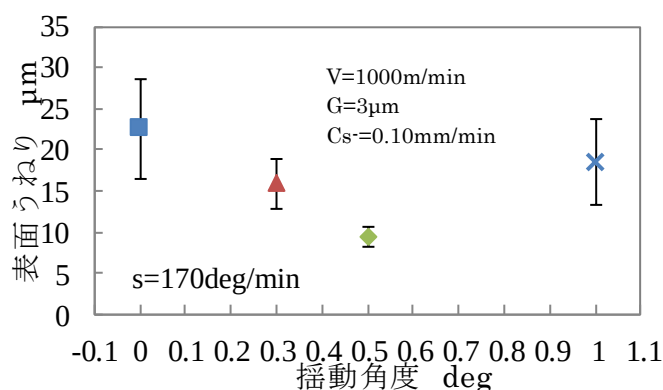


図 1-24. 揺動角度と表面うねりの関係

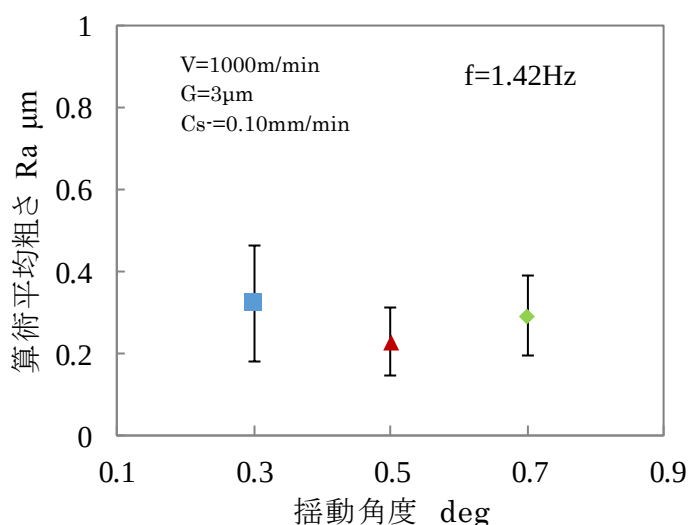


図 1-25. 揺動角度と算術平均粗さの関係

より詳細な影響因子を特定するには振動数による影響を考慮する必要がある。したがって、前述した実験において最も表面性状の良い揺動角度 0.5deg、振動数 1.42Hz を基準にし、その±0.2deg の揺動角度における挙動を振動数一定条件下（f=1.42Hz）で確認した。図 1-25 に揺動振動数を一定（f=1.42Hz）として揺動角度を変化させた際の算術平均粗さ（切断方向）の挙動を示す。揺動角度による影響は小さいことが分かる。

図 1-26 に揺動振動数を一定（f=1.42Hz）として揺動角度を変化させた際の表面うねりの挙動を示す。ワイヤー走行方向、切断方向共に揺動角度による影響は小さいことが分かる。

揺動振動数一定条件下においては、単位時間当たりの揺動運動回数が一定となる。よって、各条件において加工部へのスラリの流入・流出性は一定であったものと考えられる。また、揺動振動数が一定であることで、単位時間当たりにワイヤーが被削材を

擦る回数も一定となる。したがって、揺動振動数一定条件下においては、算術平均粗さおよび表面うねりが揺動角度の影響を受けにくかったものと考えられる。

③ 揺動振動数がウエハ表面性状に与える影響

揺動運動を付加してシリコンのスライシング加工を行い、揺動振動数がウエハ表面性状に及ぼ

図 1-27. 揺動振動数と算術平均粗さの関係

す影響を検討した。図 1-27 に揺動角度を一定 ($\theta = 0.5\text{deg}$) として揺動振動数を変化させた際の算術平均粗さ (切断方向) の挙動を示す。切断方向では揺動振動数 0.708Hz と 1.42Hz が同程度であり、2.83Hz では悪化していることが分かる。

図 1-28 に揺動角度を一定 ($\theta = 0.5\text{deg}$)

として揺動振動数を変化させた際の表面うねりの挙動を示す。切断方向では揺動振動数 0.708Hz と 1.42Hz が同程度であり、2.83Hz ではわずかに悪化していることが分かる。揺動振動数が大きくなると、単位時間当たりの揺動運動回数が増加し、ワイヤーが単位時間当たりに被削材を擦る回数が増加する。したがって、揺動振動数 2.83Hz では揺動運動によってワイヤーが被削材を擦る回数が増加し、表面うねりが悪化したものと考えられる。

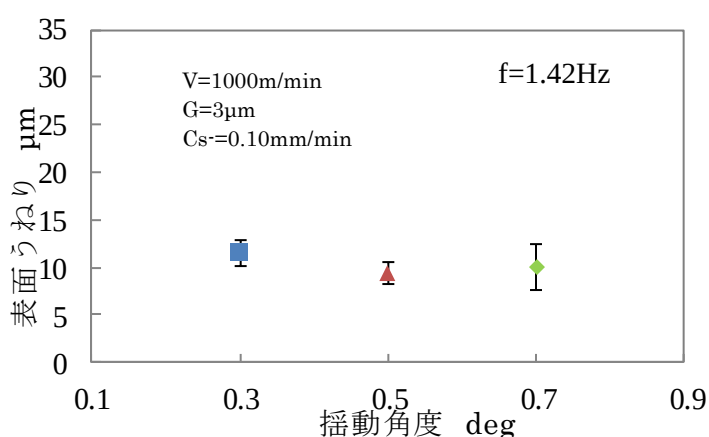


図 1-26. 揺動角度と表面うねりの関係

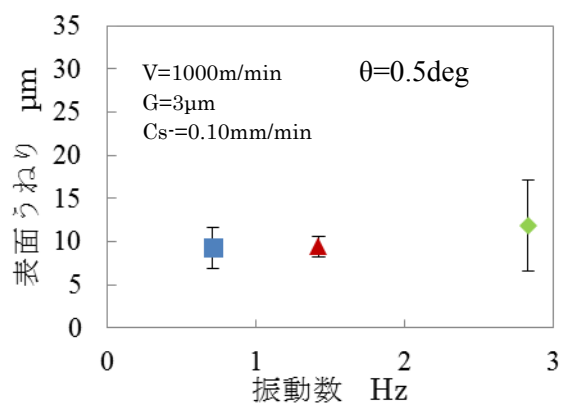
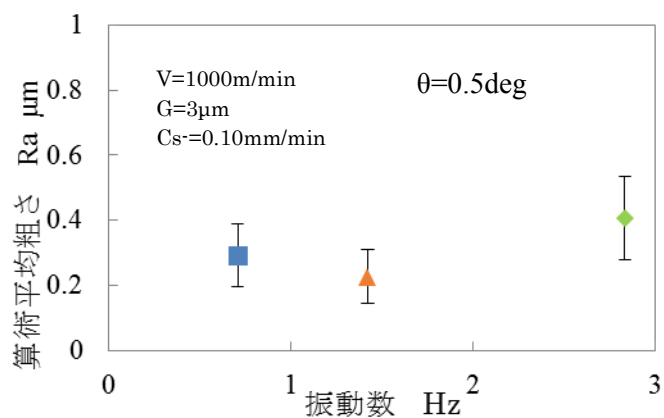


図 1-28. 揺動振動数と表面うねりの関係

【1-3】-2 試作機開発に必要な要求事項のまとめ

【1-2】、【1-3】で得られた結果より、樹脂コーティングワイヤー対応機に求められる性能事項を以下に述べる。

① 線速

従来から研究室で行っている太陽電池用シリコンの切断実験は線速 500m/min で行い、本サポイン申請課題で行った実験装置では線速 1000m/min で実験を行った。それらの実験結果を比較すると、樹脂コーティングワイヤーは加工液の冷却効果によって十分利用可能であった。通常のラッピング理論では、線速は早い方が高能率切断が期待できるため、樹脂コーティングワイヤー対応機では 1500m/min 程度まで向上させる必要がある。

② 張力

今回の円形 SiC 工作物の切断実験では、切断開始約 5mm 程度の範囲の加工面のうねりが極端に悪く、それ以降は向上していた。この結果より、工作物を切断するには加工初期のワイヤー蛇行が問題であり、この部分のうねり精度が加工面の全体の精度に強く影響を及ぼしている。そのため、加工初期の張力のみ高くして切断できるような加工中の張力変動機構を有する装置が必要であると判断される。

③ スラリーの供給・回収機構

本サポイン申請課題で行った実験ではスラリーとして砥粒濃度 5wt%のダイヤモンドスラリーを利用している。ダイヤモンド砥粒のコストは通常のワイヤーソーで用いる砥粒に比して高コストで、撥水性が高いため、加工液中で沈降しやすい。そのため、本加工方法対応機では、装置下部の砥粒受けの部分で沈殿する砥粒を極限まで低減できる様な勾配を有する受け皿にする。ワイヤー張力調整部にワイヤーに付着して運ばれる微量スラリーに至るまできちんと回収できる勾配を有する受け皿が必要である。また、ダイヤモンドスラリーは既述のようにダイヤモンド砥粒が沈降しやすいため、スラリートankから加工液供給ノズルまでの配管並びに装置下部のスラリー回収受け皿からスラリートankまでの配管で砥粒が溜まらないように、管の内部と加工液の摩擦や管の曲げ部の形状を工夫する必要がある。

④ ボビン回収時にワイヤーに与えるダメージ低減

本加工法で利用しているワイヤーはその表面に樹脂がコーティングしてある。ワイヤーを加工中に往復走行させる時に、ワイヤーは巻き取りボビンに巻き付いたり、巻き取りボビンから送り出したりする。その際に、ワイヤー表面の樹脂をボビンのつば等の部分で傷をつけている。ボビンの形状やワイヤーとの摩擦性を向上させる必要がある。

【2】－1 樹脂コーティングワイヤーに対応した加工部材の最適化
(実施項目【2】／株式会社タカトリ)

【2－1】－1 スラリーの最適化(ダイヤモンドの種類、粒径、形状、濃度等)

(1) 砥粒濃度の最適化

詳細は、【1-1】－1 の従来機を用いた鏡面スライス加工技術の評価テストの部分と内容が重複するため、ここでは概要のみを記載する。砥粒濃度の評価は3インチインゴットを用いて3水準の濃度でおこなった。今回実施した内容においては濃度が濃い水準で精度が良化するという結果になった。

【2－2】－1 被加工物の基材および接着剤の最適化

(1) 接着剤の最適化

【1-1】－1 で実施したスライシング加工において、ワイヤー線速は700m/min で実施していた。だが本サポインで製作した試作機では線速1000m/min での装置動作が出来るようになった。そこで線速1000m/min での評価をすすめたところ、切断中にインゴットが脱落するという現象が発生した。脱落のイメージを図2－1に示す。さらに、この時ワイヤーの樹脂磨滅低減を目的としてワイヤーに被服している樹脂厚みも5um から7um に変更していた。これらの状況から、線速を上げたことならびに樹脂の厚みを増したことにより切削時の抵抗が増加したことが脱落の原因だと考えている。もう別の原因として、インゴット自体が加工液の温度(約40℃)よりも高温(約70℃と推定)になっていたことから、接着剤が加工中の発熱により軟化したとも考えられる。

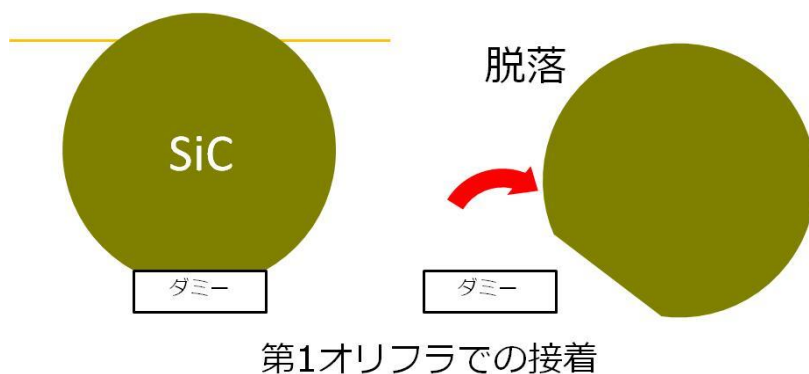


図2－1. インゴット脱落のイメージ

インゴットの脱落は、切断において回避すべき重要な事柄である。脱落を低減するため上記で示した3つの脱落因子(線速を上げたこと、樹脂厚を増やしたことによる切削抵抗の増加、または加工時の発熱による接着剤の軟化)をもとに対処策を検討した。対応策として、従来から使用している接着剤を変更することを検討した。

具体的には、従来から使用している日化精工製のUボンド(STタイプ・WRタイプ)、Qボンドおよび前記3種類のボンドよりもガラス転移点の高いアクリル系の接着剤を準備し脱落の有無を評価した。評価方法は同条件下で実際に脱落するかどうかを評価した。各ボンドでの脱落の有無の結果をまとめたものを表1に示す。評価を行うにあたり切断速度1.8mm/h、3.6mm/h、5.4mm/hの3水準と設定し脱落の有無を確認した。結果として、アクリル系の接着剤にて接着したものが最も負荷が大きいと考えられる条件でも脱落せずに切断出来た。このことからアクリル系ボンドに接着材を変更することにした。また、接着剤としての接着性が高いということは得られたウエハから接着剤を剥離する際に剥離性が下がるということも意味しているため、温水での剥離テストを行った。温水で剥離した部材を図2-2に示す。どの部材でも容易に剥離出来ることを確認できた。今回使用した接着剤は温水により剥離することも可能であるため剥離性に関しても十分な機能を有していることがわかった。

表 2-1. 各ボンドでの脱落の有無

	切断速度(mm/h)		
	1.8	3.6	5.4
Uボンド(ST)	×	/	
Uボンド(WR)	○		
Qボンド	/		×
アクリル系ボンド			○



図 2-2. 剥離テストを行った部材

(2) ダミー材の最適化

遊離や固定ではセラミックのダミー材（犠牲材）を使うことが多い。しかし、樹脂コーティングワイヤーでの切断においては、図 2-3 のようにワイヤーの摩耗や切断精度の悪化が SiC とダミー材の境界面で発生することが顕著にみられた。このことから、最適なダミー材の選定をするための評価を実施した。評価方法としては、切断時のダミー材の切り込み量、切断の直進性、

ワイヤーの摩耗量とした。また、切断条件はすべて同条件とした。切断量は、4mm に設定した。切断深さに関しては 4mm に近い結果となる切断条件を良好な切断とすることにした。

対象としたダミー材は、セラミック、ガラス、カーボン、シリコン、サンビームの 5 種類である。評価したダミー材の写真と結果を図 2-4 に示す。結果として、切り込み量の深さと切断の直進性に関して良好な結果を得たのはガラスとシリコンであった。しかし、ワイヤーの摩耗のしにくさという点ではカーボンおよびサンビームの方が良好な結果となった。今回、評価項目として設定した切り込みの深さ、切断の直進性、ワイヤーの摩耗の少なさのすべてを満たす材料を見つけることは出来なかった。ただし、ワイヤーの摩耗に関してはワイヤーの供給量を調整することで回避することが可能であることから、現時点ではガラスとシリコンが本実験で良好なダミー材であるという結論を出した。またシリコンに関しては、SiC と接着させてスライシング加工を行ったが、接着性および剥離性に問題は無く、また切断精度にも影響はみられなかった。だがシリコンは量産で扱うと考えた場合に高価な材料なので、安価で最適なダミー材を探すことが今後の課題である。

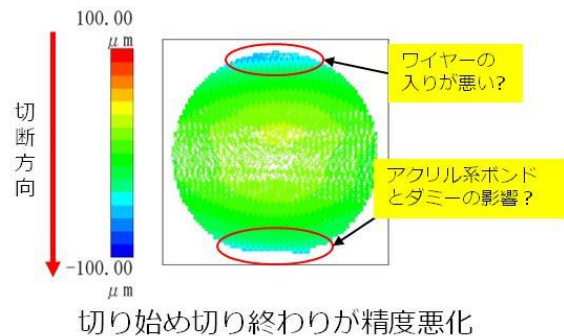


図 2-3 切断したウエハの状態

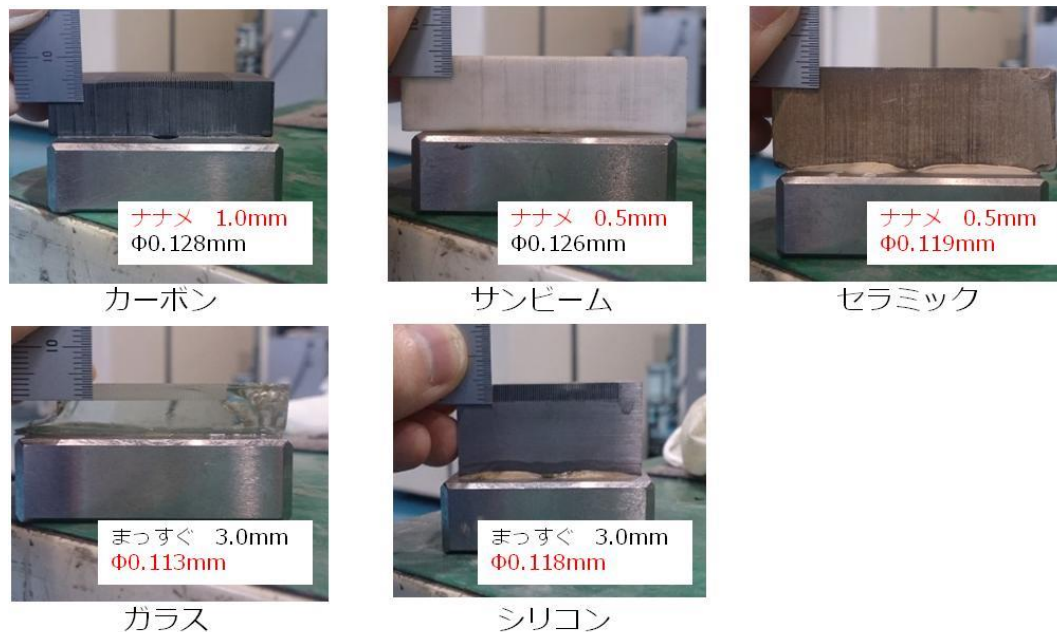


図 2-4. 評価したダミー材写真と結果

【2-3】-1 部材類の最適化のまとめと最適な組み合わせの抽出

【2-1】-1と【2-2】-1で得られた結果より、部材類の最適化と最適な組み合わせを以下に述べる。

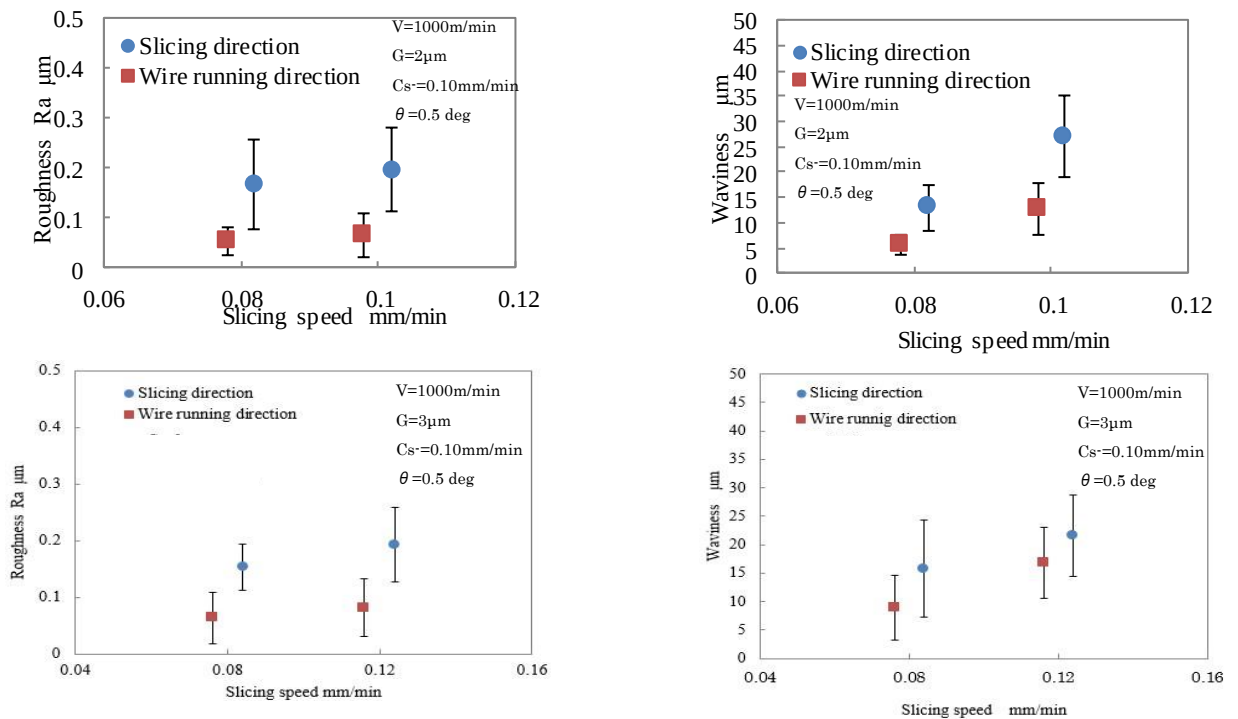
- ① 砥粒濃度に関しては、濃い水準において PV 値の良化が見られた。
- ② 線速を高くすることと樹脂厚みを厚くすることはワイヤー走行方向への切削抵抗を増加させると考えられる。
- ③ U ボンド、Q ボンドおよびアクリル系ボンドで接着能力が 1 番優れていたのはアクリル系ボンドであった。またアクリル系ボンドは温水で剥離することも可能なため剥離性に関しても優れていることがわかった。
- ④ 樹脂コーティングワイヤーでダミー材をスライシング加工する際に、ワイヤーの直進性および切り込み量という点において、問題なく使用できると考えられるのはシリコンとガラスであった。またワイヤーの磨耗に関してはワイヤー供給量を多めに送ることにより改善できると考えられる。

【2】－2 樹脂コーティングワイヤーに対応した加工部材の最適化
(実施項目【2】／金沢工業大学)

【2－1】－2 スラリーの最適化(種類、粒径、形状、濃度等)

① 砥粒径が $2\mu\text{m}$ の時に切断速度が表面性状に与える影響

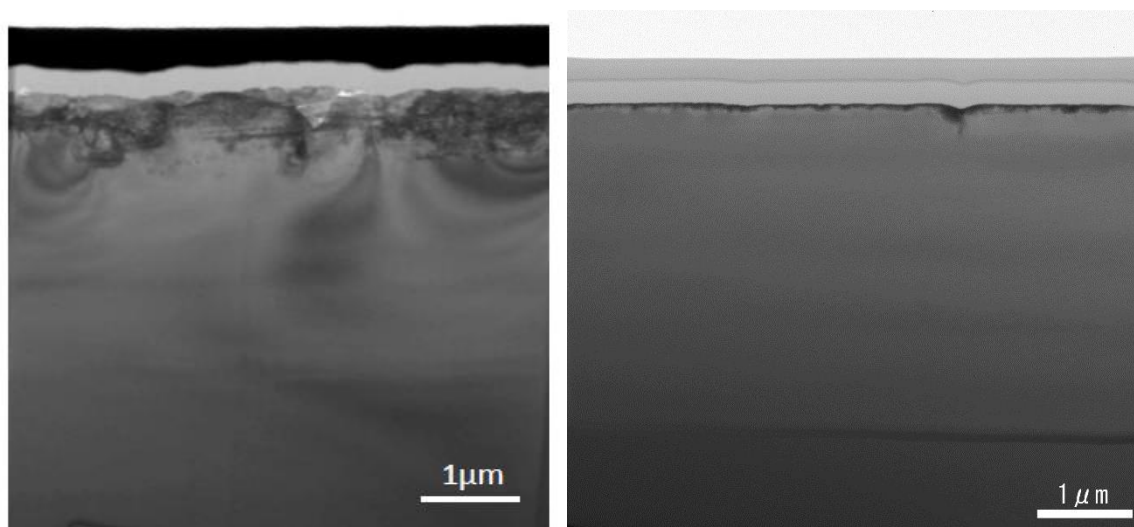
図1に粒径が $2\mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒を用いた時の切断速度とウエハ表面性状の関係を示す。同図(a)は表面粗さ、同図(b)は表面うねりの挙動である。同図(a)より、切断速度を上昇させても表面粗さはほとんど変化がないことがわかる。また、同図(b)より、切断速度を上昇させた時、ワイヤー走行方向及び切断方向において表面うねりが悪化していることがわかる。また、図2-5の砥粒径で比較すると、切断速度が 0.08mm/min の時は粒径が $2\mu\text{m}$ の砥粒を用いた方が表面うねりはワイヤー走行方向及び切断方向ともに向上していることが分かる。そして、切断速度を上昇させると、粒径が $2\mu\text{m}$ の場合の方が表面うねりは悪化しやすいことが明らかとなった。



(a)粗さ (b)うねり
図2-5. 切断速度と加工表面性状の関係(上砥粒径 $2\mu\text{m}$ 、下砥粒径 $3\mu\text{m}$)

② 加工変質層に関する検討

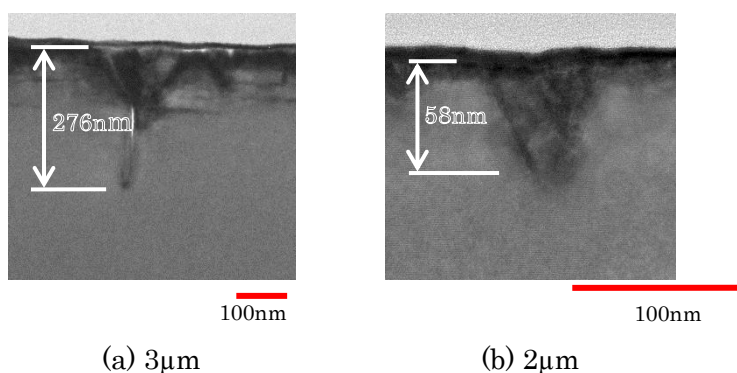
図 2-6 に加工後のウエハ切断面の TEM 観察写真を示す。同図(a)は固定砥粒方式で加工したウエハで、同図(b)は樹脂コーティングワイヤー方式で切断速度を 0.08mm/min、砥粒径 1 μ m として加工したウエハを示す。図中の写真は倍率が同じになるようにして提示してある。同図(a)より、固定砥粒方式で切断した場合には加工変質層の大きさは 5~10 μ m で、実際の加工変質層は写真を大きくはみ出している。それに対して、同図(b)に示す樹脂コーティングワイヤー方式では小さいところで 20nm、大きいところで 60nm 程度であった。以上の結果より、樹脂コーティングワイヤー方式による切断ではウエハ表面のダメージ層の大きさを飛躍的に改善できることがわかる。



(a)ダイヤモンドワイヤソー

(b)樹脂コーティング方式

図 2-6. ダイヤモンドワイヤソーと樹脂コーティング方式の切断面比較



(a) 3 μ m

(b) 2 μ m

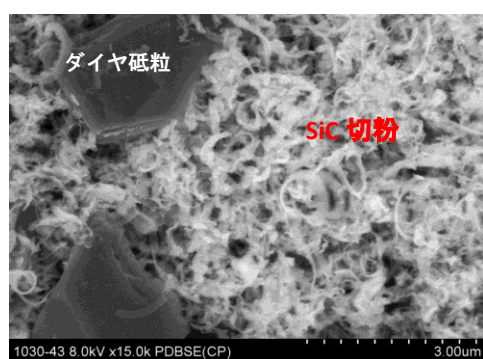
図 2-7. 砥粒径の違いがダメージに与える影響

図 2-7 に樹脂コーティングワイヤー方式で切断速度を 0.08mm/min とし、砥粒径を変えたときの TEM 観察写真を示す。同図(a)は砥粒径が 3 μ m の砥粒で、同図(b)は砥粒径が 2 μ m

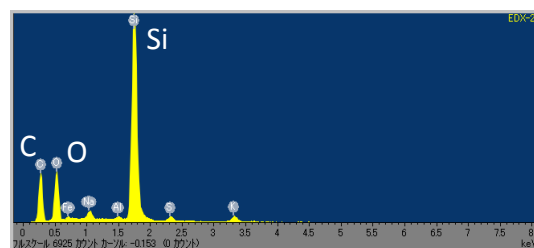
の砥粒で加工したウエハである。同図より、 $3\mu\text{m}$ 砥粒の場合に加工変質層の大きさは 276nm であることがわかる。同図(c)は砥粒径が $2\mu\text{m}$ の砥粒で加工したウエハである。同図より、加工変質層の大きさは 58nm であることがわかる。よって、砥粒径が小さい方が加工時のダメージを低減できることが明らかとなった。また、同図より樹脂コーティングワイヤー方式では、潜傷は観察されなかった。

図 2-8 に粒径が $2\mu\text{m}$ の砥粒を用いた時の加工液中に存在する加工後の切り屑の分析結果を示す。同図(a)は観察写真を示し、同図(b)はEDX 分析の結果を、同図(c)は顕微ラマンによる分光分析の結果をそれぞれ示す。同図(a)より、切り屑の形状が流れ型となっていることがわかる。このことから、粒径 $2\mu\text{m}$ でも樹脂コーティングワイヤー方式は延性モード加工となることが明らかとなった。また、EDX の分析結果とラマン分光分析の結果より、切粉の成分は Si、C、O が検出され、Si-C 結合は検出できないが、Si-O 結合が見られることが明らかとなった。これらのことから、本加工方式では SiC は酸化しながら加工されていることが明らかとなった。

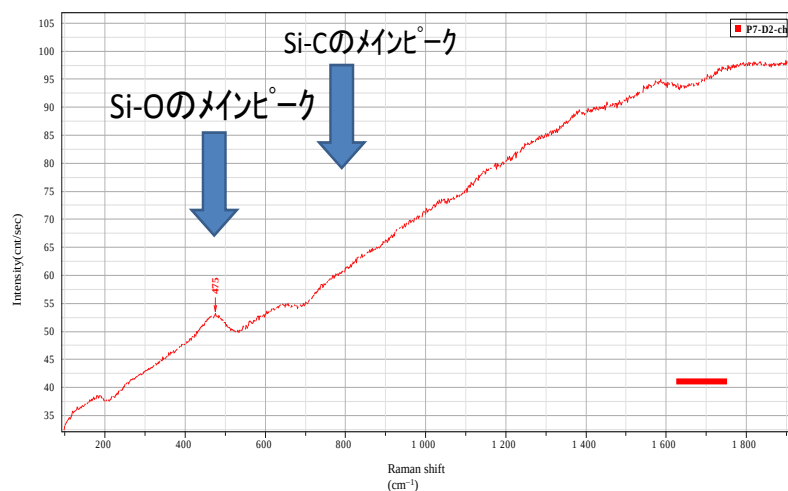
このような現象を加工部で生じているため、固定砥粒方式よりも樹脂コーティングワイヤー方式の方が加工変質層は小さくなったと考えられる。



(a) 切粉



(b) 切粉の EDX 分析



(c) ラマン分光分析

図 2-8. 切粉の分析

③ ワイヤ線速が表面性状に与える影響

図 2-9 にワイヤ線速と表面粗さの関係を示す。同図より表面粗さはワイヤ線速を上昇させるとワイヤ走行方向及び切断方向ともに向上していることがわかる。ここで、図 2-10 に加工後のワイヤ工具の観察写真を示す。同図 (a) はワイヤ線速 1000m/min、同図 (b) はワイヤ線速 1300m/min の時の観察写真である。同図より、ワイヤ線速を上昇させてもほとんどワイヤ表面に食い込んだ砥粒の数は変わらなかった。そのため、表面粗さが向上したのは、ワイヤ線速が上昇したことで砥粒 1 つ当たりの除去量が減ったためであると考えられる。

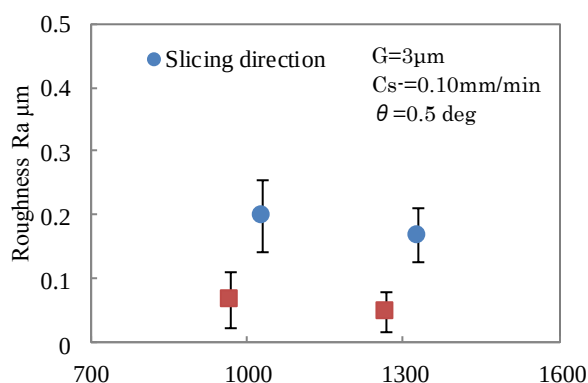
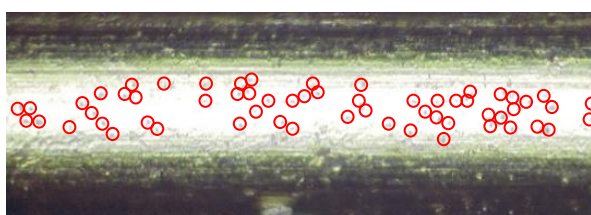
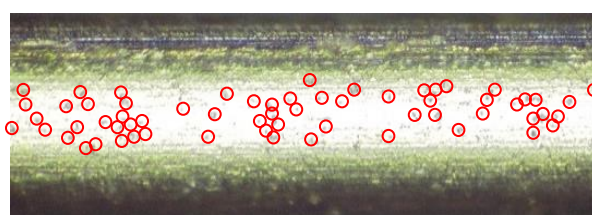


図 2-9. ワイヤ走行速度と粗さの関係



100μm



100μm

図 2-10. 加工後のワイヤ表面の観察

図 2-11 にワイヤ線速と表面うねりの関係を示す。同図より、表面うねりも表面粗さと同様にワイヤ線速を上昇させることでワイヤ走行方向及び切断方向の表面うねりが向上したことがわかる。これは、ワイヤ線速を 1000m/min から 1300m/min に上昇させることで単位時間当たりのワイヤの走行量が 1.3 倍に増加するため、ワイヤ線速を上昇させることで切断性が良くなり、加工時におけるワイヤのたわみ量が減少したため、加工後の表面うねりが向上したと考えられる。よって、ワイヤ線速を上昇させることで高精度の切断加工ができる可能性があることが明らかとなった。

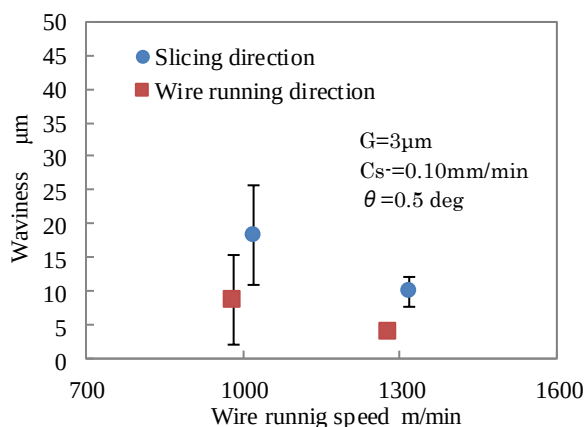


図 2-11. ワイヤ線速と表面うねりの関係

⑤ 砥粒径が変化した時のウエハ表面の変化

図 2-12 に加工後のウエハ表面の観察写真を示す。同図(a)は粒径が $1\mu\text{m}$ 、同図(b)は粒径が $2\mu\text{m}$ 、同図(c)は粒径が $3\mu\text{m}$ の砥粒を用いた時のウエハ表面の観察写真である。同図より、粒径 $2\mu\text{m}$ 、粒径 $3\mu\text{m}$ 、粒径 $1\mu\text{m}$ の順でウエハ表面のスクラッチ痕が少ないことがわかった。また、粒径が $1\mu\text{m}$ の時はウエハ表面のスクラッチ痕はほとんど存在しなかった。ここで、図 2-13 に加工後のウエハを用いて、ウエハ表面への文字の反射状況の観察を行った。同図(a)は粒径 $1\mu\text{m}$ 、同図(b)は粒径 $2\mu\text{m}$ 、同図(c)は粒径 $3\mu\text{m}$ の砥粒を用いた時の観察写真である。同図より、粒径 $2\mu\text{m}$ 、粒径 $3\mu\text{m}$ 、粒径 $1\mu\text{m}$ の順にウエハ表面への文字の反射度合いが高くなることがわかった。

以上の結果より、砥粒径が $1\mu\text{m}$ の砥粒で加工した時、加工面のスクラッチ痕を低減できるため、ウエハ表面への文字の反射度合いが高くなることが明らかとなった。

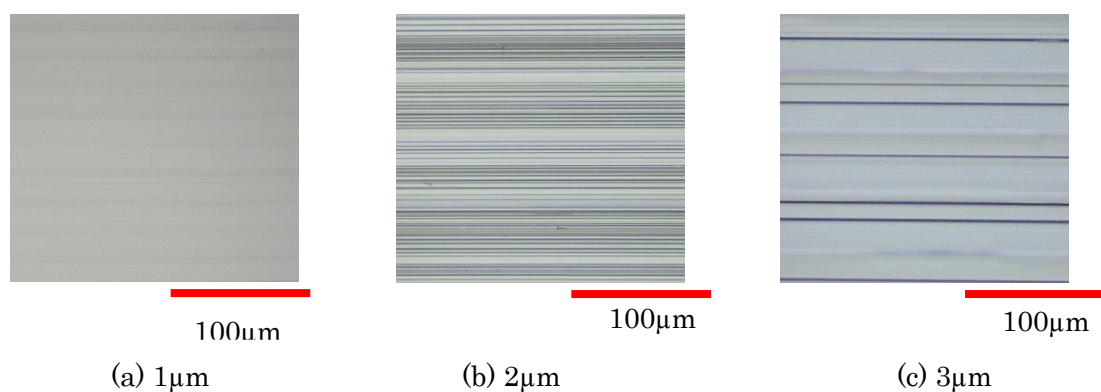


図 2-12. ウエハ表面の観察

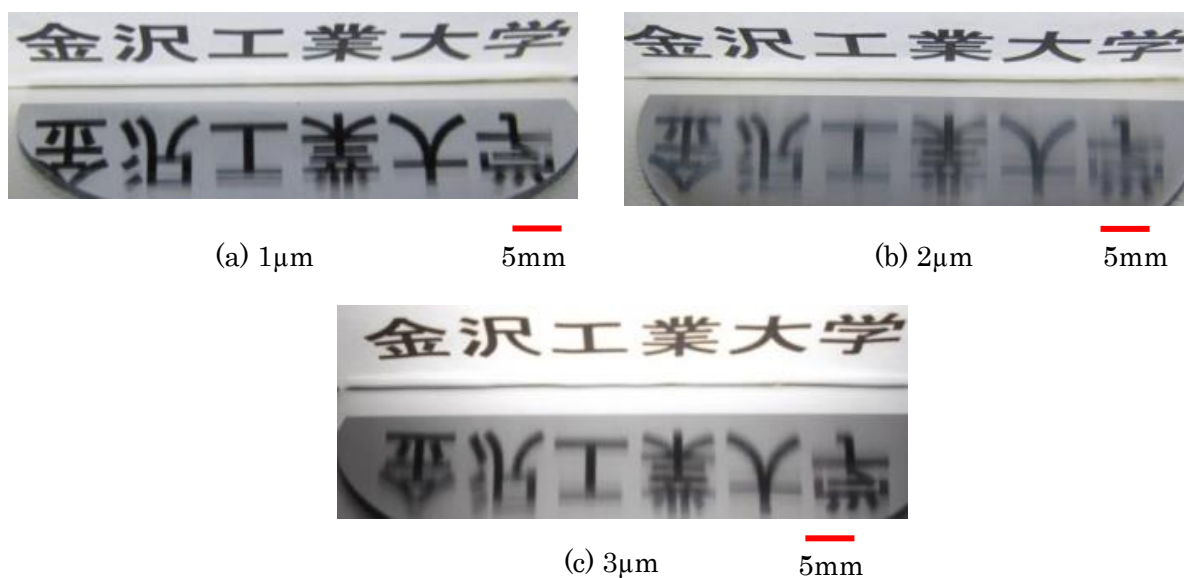
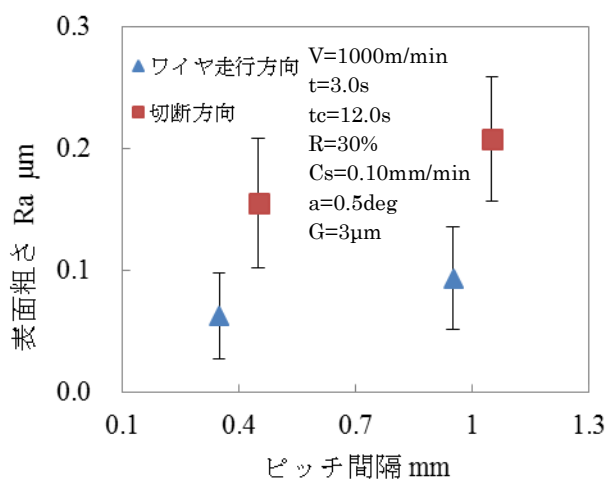
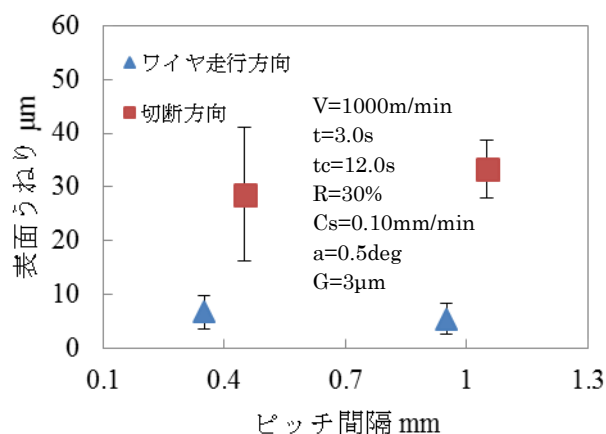


図 2-13. ウエハ表面への文字の反射状態

半導体ウエハを搭載するパワーデバイス、厚み方向へ電流を流すため、ウエハを薄くすることでオン電圧の低い、低損失なパワーデバイスとすることが出来る。そこで、上述の範囲では溝ピッチの間隔を 1.0mm で加工を行っていたが、溝ピッチの間隔を 0.4mm にして加工を行った。図 2-14 にメインローラーの溝ピッチの間隔とウエハ表面性状の関係を示す。同図(a)が表面粗さ、同図(b)が表面うねりを示している。同図(a)より、溝ピッチの間隔が 0.4mm で加工した際のウエハの表面粗さは向上している。また、同図(b)より、切断方向の誤差範囲は増加したものの表面うねりの平均値は向上している。これは、5 巻きしたワイヤーの 1 本目から 5 本目の間隔が溝ピッチの間隔 1.0mm の場合では 4.0mm、溝ピッチの間隔 0.4mm の場合では 1.6mm となり、ワイヤーの間隔が溝ピッチの間隔 0.4mm では 1.0mm に比べ半分以下となる。ワイヤー同士の間隔が狭くなることで、表面張力が大きくなり、ワイヤーでのスラリーの保持性

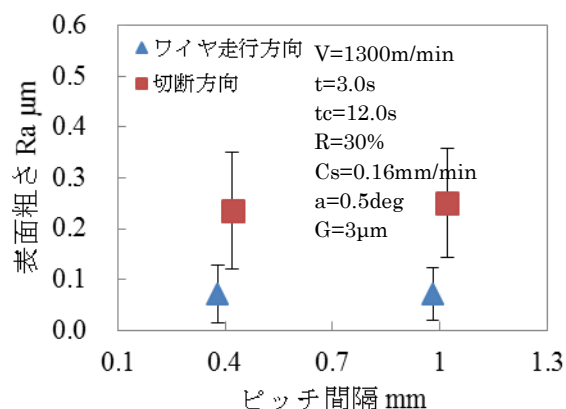


(a) 表面粗さ

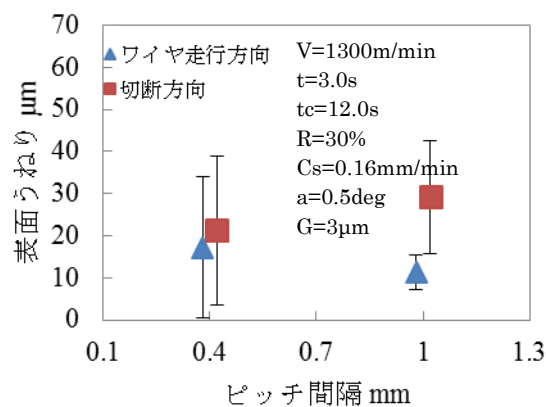


(b) 表面うねり

図 2-14. 溝ピッチ間隔とウエハ表面性状の関係



(a) 表面粗さ



(b) 表面うねり

図 2-15. ワイヤ走行速度と切断速度を速くした際の溝ピッチとウエハ表面性状の関係

が高くなる。この結果より、メインローラーの溝ピッチの間隔を狭くするとウエハの表面性状は向上したものと考えられる。

図 2-15 にワイヤー走行速度と切断速度を速くした際の溝ピッチの間隔とウエハ表面性状の関係を示す。同図(a)が表面粗さ、同図(b)が表面うねりを示している。図 2-14(a)と図 2-15(a)より、ワイヤー走行速度と切断速度を速くするとピッチ間隔 0.4mm で加工した際の切断方向の表面粗さは、ピッチ間隔 1.0mm の場合に比べより悪化している。これは、切断速度を速くしたことによりワイヤーのたわみ量が増加し、切断荷重が大きくなったためだと考える。図 2-14(b)と図 2-15(b)より、ワイヤー走行速度と切断速度を速くするとピッチ間隔 0.4mm で加工した際の切断方向の表面うねりは、ピッチ間隔 1.0mm の場合に比べ誤差範囲は大きくなったが平均値は向上していることが分かる。この結果より、ワイヤー走行速度を速くすると表面うねりが向上し、より高精度な加工が行えるということが明らかとなった。

【2-2】-2 被加工物の基材および接着剤の最適化

接着剤の最適化実験は加工時間の短縮と加工コストの短縮を目指してシリコンのブロックで以下に述べる実験を行った。

① 接着剤のガラス転移温度による加工特性への影響

図 2-16 に加工後のウエハを示す。同図(a)は切断後のウエハのモデル図を、同図(b)は同図(a)の□の点線で囲った付近のウエハの観察写真を示す、同図(b)より、ウエハ中央部と比較すると、接着面側の表面が白くなっていることが分かる。この部分は、工作物を固定している接着剤部分を切断している時で、接着剤を切断することによって切断特性が変化したためにこのような面を生じたと考えられる。この部分の切断性を向上させるために、接着剤のガラス転移温度に着目し、接着剤の切断性によるウエハ下部への影響について評価を行った。

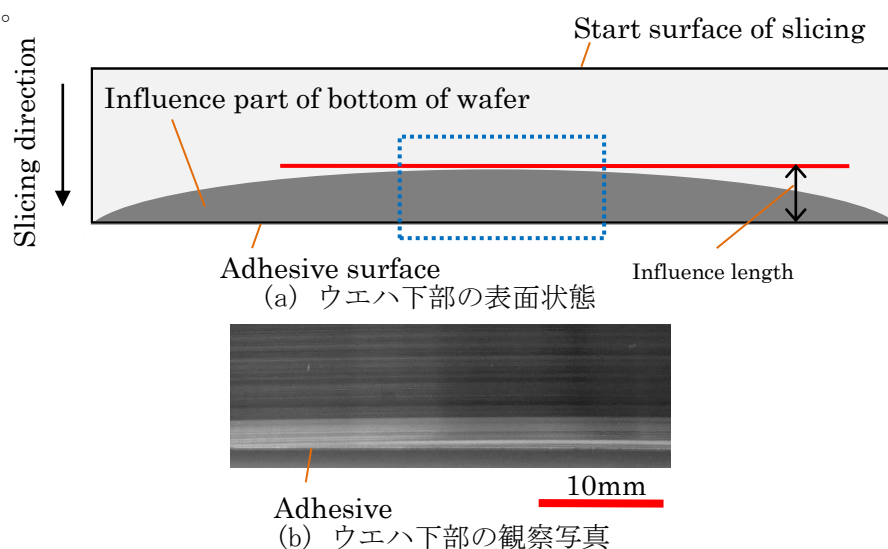


図 2-16. 切断後のウエハ

まず図 2-17 にガラス転移温度と切断荷重の関係を示す。同図より、ガラス転移温度が高くなることで、切断荷重は減少していることが分かる。これはガラス転移温度が高い接着剤の場合では、加工熱による接着剤の特性が変化しにくいため、切断荷重の変化は小さくなったと考えられる。

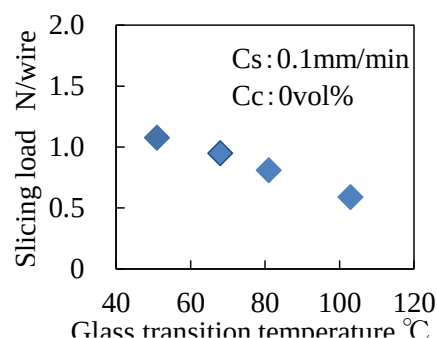
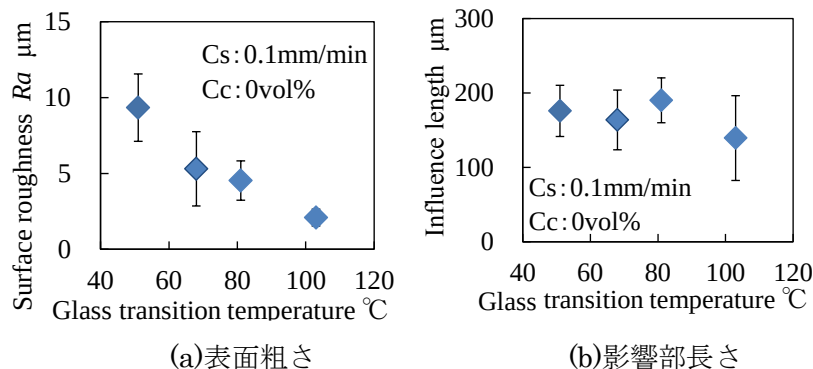


図 2-17. ガラス転移温度と切断荷重の関係

次に、図 2-18 にガラス転移温度とウエハ下部の加工特性について示す。同図 (a) はウエハ下部表面粗さ、同図 (b) はウエハ下部影響部長さを示す。同図 (a) より、ガラス転移温度が高くなることで、ウエハ下部表面粗さは小さくなることが分かる。

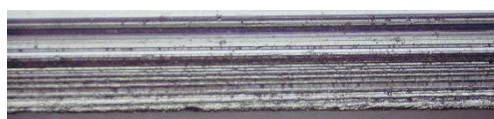
同図 (b) より、ウエハ下部影響部長さはガラス転移温度が高くなることで、小さくなる傾向があることが分かる。これは接着剤のガラス転移温度が高くなることで、加工中に発生する摩擦熱や加工熱の影響によって、切断性が向上し、切断荷重が小さくなることから、切断性が向上したため、ウエハ下部の表面粗さと影響部長さが小さくなると考えられる。



(a)表面粗さ

(b)影響部長さ

図 2-18. ガラス転移温度と加工特性の関係



200μm

(a)ガラス転移温度：51℃



200μm

(b)ガラス転移温度：103℃

図 2-19. 切断後のウエハ表面の観察

ここで、図 2-19 に実験後のウエハの観察写真を示す。同図 (a) はガラス転移温度 51℃、同図 (b) はガラス転移温度 103℃の時の観察写真である。同図より、ガラス転移温度が 51℃では、ウエハ下部に脆性破壊や深いスクラッチ痕が見られるが、ガラス転移温度が 103℃では、51℃の時と比べ、ウエハ下部における脆性破壊や深いスクラッチ痕が少なくなっていることが分かる。

② 接着剤の厚さによる接着剤の切断性への影響

図 2-20 に接着剤の膜厚と切断荷重の関係を示す。同図より、切断荷重は膜厚が薄くなることで、小さくなる傾向があることが分かる。ここで、図 2-21 に加工後のワイヤーの観察写真を示す。同図(a)は接着剤の膜厚が $40\mu\text{m}$ の場合、同図(b)は接着剤の膜厚が $15\mu\text{m}$ の場合をそれぞれ示す。同図より、接着剤の膜厚が $15\mu\text{m}$ の場合には、 $40\mu\text{m}$ の時よりもワイヤー表面に押し込まれている砥粒の数が増えていることが分かる。よって、接着剤を薄く塗布することで、接着剤の切断時間が短縮され、ワイヤー表面の樹脂に押し込まれた砥粒が多くなり、その結果、切断荷重の変化が小さくなったと考えられる。

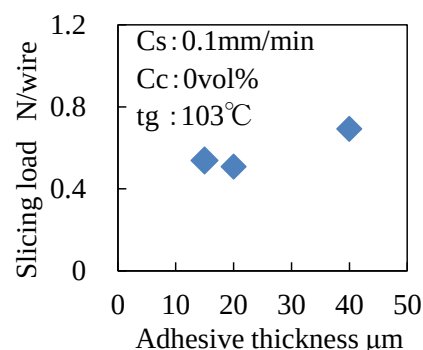


図 2-20. 接着剤塗布厚みと切断荷重の関係

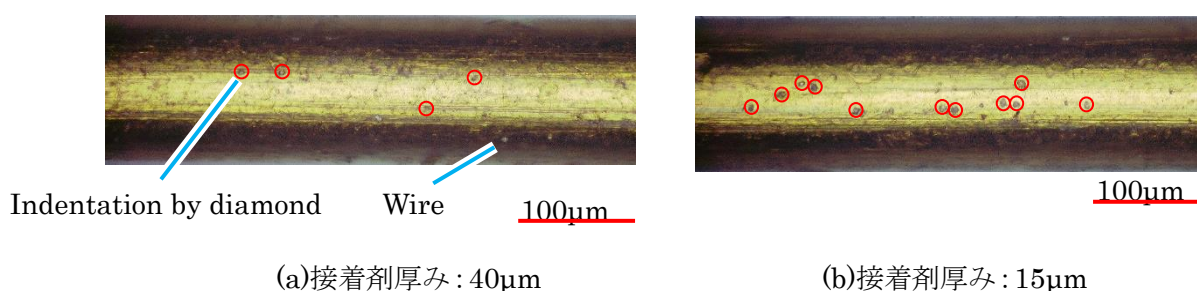


図 2-21. 切断後のワイヤ表面の観察

時の切断荷重が小さくなり、ワイヤー表面の樹脂に砥粒が多く押し込まれたため、ウエハ下部加工の際の有効砥粒数が増加し、ウエハ下部の表面粗さ、影響部長さが小さくなったと考えられる。以上の結果より、接着剤の膜厚を薄くすることで、接着剤の切断時間が短縮され、切断性が良くなり、ウエハ下部の表面粗さと影響部長さが小さくなることが明らかとなった。

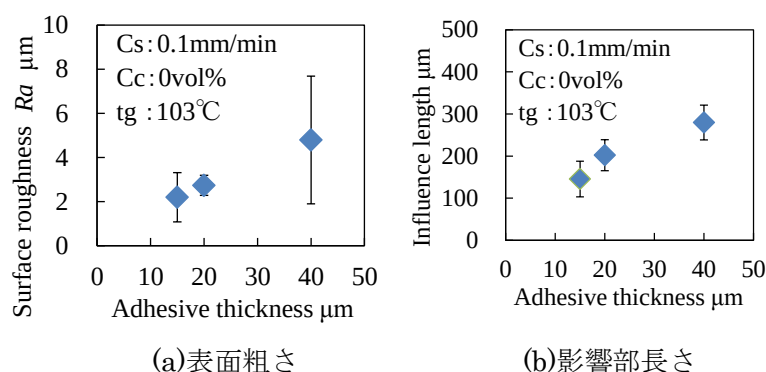


図 2-22. ガラス転移温度と加工特性の関係

【2-3】-3 部材類の最適化のまとめと最適な組み合わせの抽出

① 部材類の最適化（砥粒のアスペクト比とウエハ表面性状）

図 2-23 に砥粒のアスペクト比を変化させて加工した際のウエハ表面のスクラッチ痕の観察写真を示す。同図(a)にアスペクト比の小さい砥粒を用いて加工した際のスクラッチ痕、同図(b)にアスペクト比の大きい砥粒を用いて加工した際のスクラッチ痕を示す。これらを見ると、同図(b)より、アスペクト比の大きい砥粒を用いて加工した際のウエハ表面はワイヤ走行方向と同方向にスクラッチ痕が発生していることが分かる。また、同図(a)では、スクラッチ痕が少ないことが分かる。これは、アスペクト比を小さくするとウエハ表面に深いスクラッチ痕を発生させるような針状の砥粒が減ったため、スクラッチ痕を軽減できたと考えられる。



(a) アスペクト比小



(b) アスペクト比大

100μm

図 2-23. 砥粒のアスペクト比とスクラッチ痕の関係

② 揺動角度が加工面のソーマークに与える影響

図 2-24 にウエハ表面の顕微鏡観察写真を示す。同図(a)は揺動角度 0. 5deg で加工、同図(b)は揺動角度 0. 5deg→5. 0deg で加工した時のウエハ表面である。同図(a)、同図(b)を比較すると、揺動角度 0. 5deg→5. 0deg で加工した際のウエハ表面は揺動角度 0. 5deg で加工した際ウエハ表面に比べ、スクラッチ痕が少ないことがわかる。

③ 加減速率がウエハ表面性状に与える影響

図 2-25 にワイヤ加減速時の速度変化のモデル図を示す。同図より、加減速率とは、加工中に往復走行するワイヤ工具の加減速時間に対する S 字区分の割合を示した値である。加減速率を大きくすると、S 字区分が増加し、加減速の始めと終わりの速度変化が小さくなる。

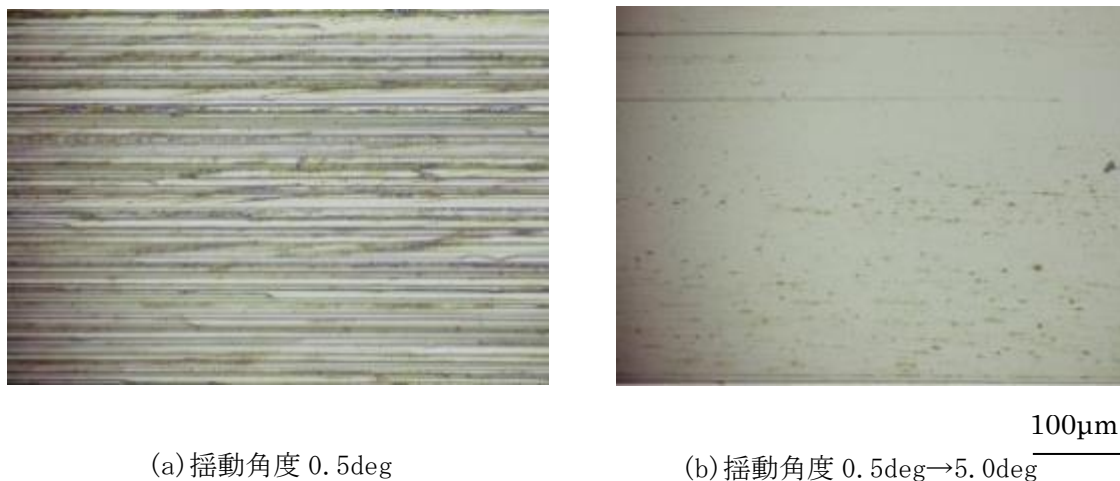


図 2-24. 揺動角度を変化させて加工した際のウエハ表面の顕微鏡観察写真

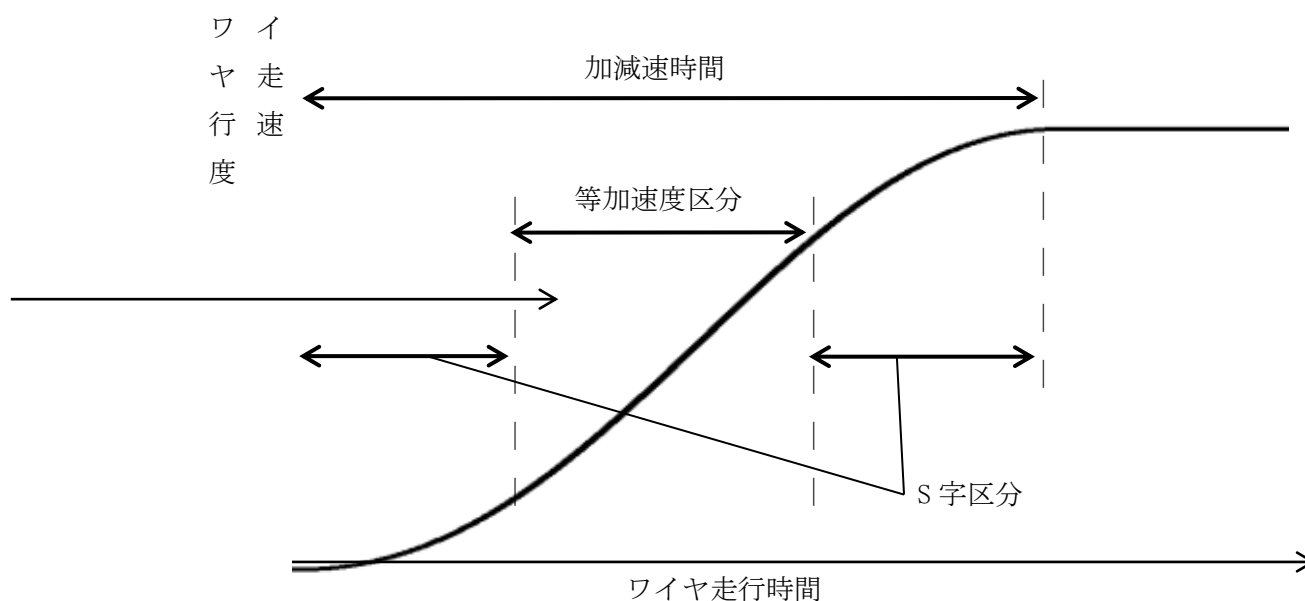


図 2-25. 加減速中のワイヤ走行速度曲線

図 2-26 に加減速率を変化せて加工した際のウエハ表面の表面粗さを示す。同図より、加減速率を 30%にすると切断方向の表面粗さが向上していることが分かる。

また、図 2-27 に加減速率を変化させた際の加工能率を示す。

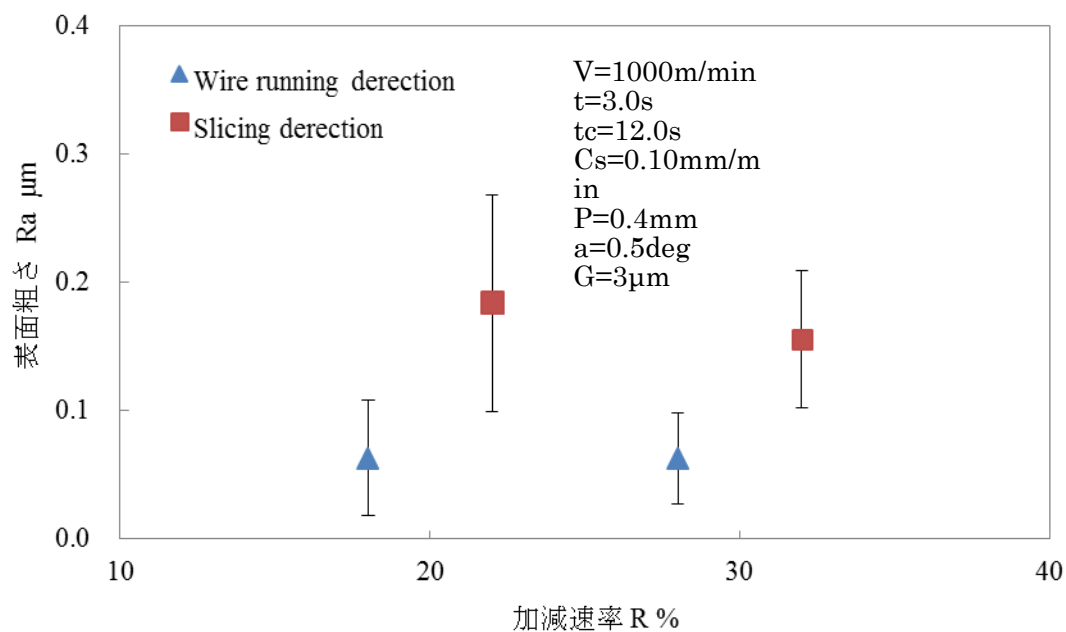


図 2-26. 加減速率と加工能率の関係

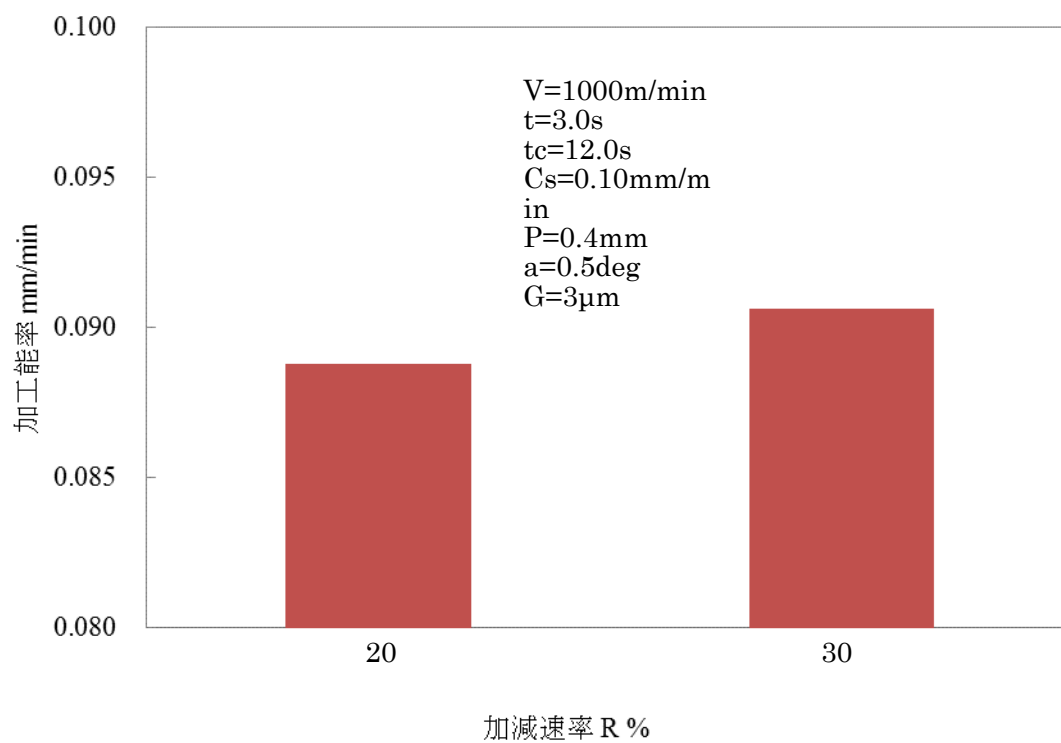


図 2-27. 加減速率と加工能率の関係

同図より、加減速率 30%は加減速率 20%に比べて加工能率が向上していることが分かる。これは、加減速率を大きくすると、加減速の始めと終わりの速度変化が小さくなり、ワイヤ反転時の張力変動が小さくなる。そのため、加減速率 20%に比べて安定した加工が可能となり、加工能率が向上したと考えられる。この結果より、加減速率を 30%にすると、加工能率が向上し、ワイヤのたわみ量が小さくなるため、切断荷重が減少する。その結果、切断方向の表面粗さが向上し、誤差範囲が小さくなったと考えられる。また、切断方向のうねりはほとんど変化しなかった。

④加減速時間がウエハ表面性状に与える影響

加減速時間とは、ワイヤ走行速度 0m/min から装置上で設定したワイヤ走行速度に達するまでの加速時間と、装置上で設定したワイヤ走行速度からワイヤ走行速度 0m/min にな

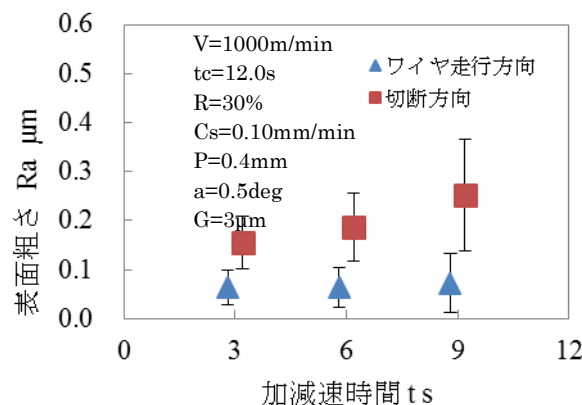


図 2-28. 加減速時間と表面粗さの関係

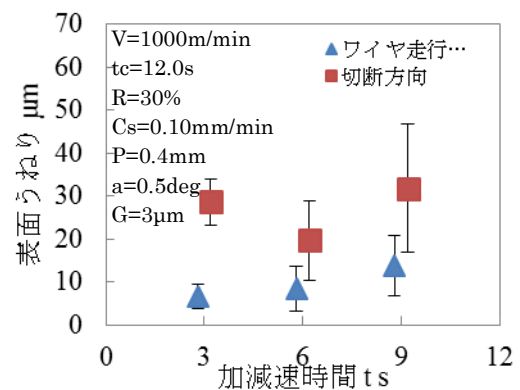


図 2-29. 加減速時間と表面うねりの関係

る減速時間のことである。

図 2-28 に加減速時間とウエハの表面粗さの関係を示す。同図より、算術平均粗さで測定すると加減速時間を長くした際の切断方向の表面粗さが悪化していることが分かる。

図 2-29 に、加減速時間とウエハの表面うねりの関係を示す。同図より、加減速時間 6.0s の切断方向の表面うねりが最も良くなっていることが分かる。しかし、傾向がはっきりとしていないため、再検討が必要であると考えられる。

④ 一定速時間がウエハ表面性状に与える影響

一定速時間とは、装置で設定したワイヤ走行速度を維持したまま、ワイヤが走行し続ける時間のことである。図 2-30 に一定速時間とウエハ表面性状及び加工能率の関係を示す。同図(a)が加工能率、同図(b)が表面粗さ、(c)が表面うねりを示す。同図(a)より、一定速時間

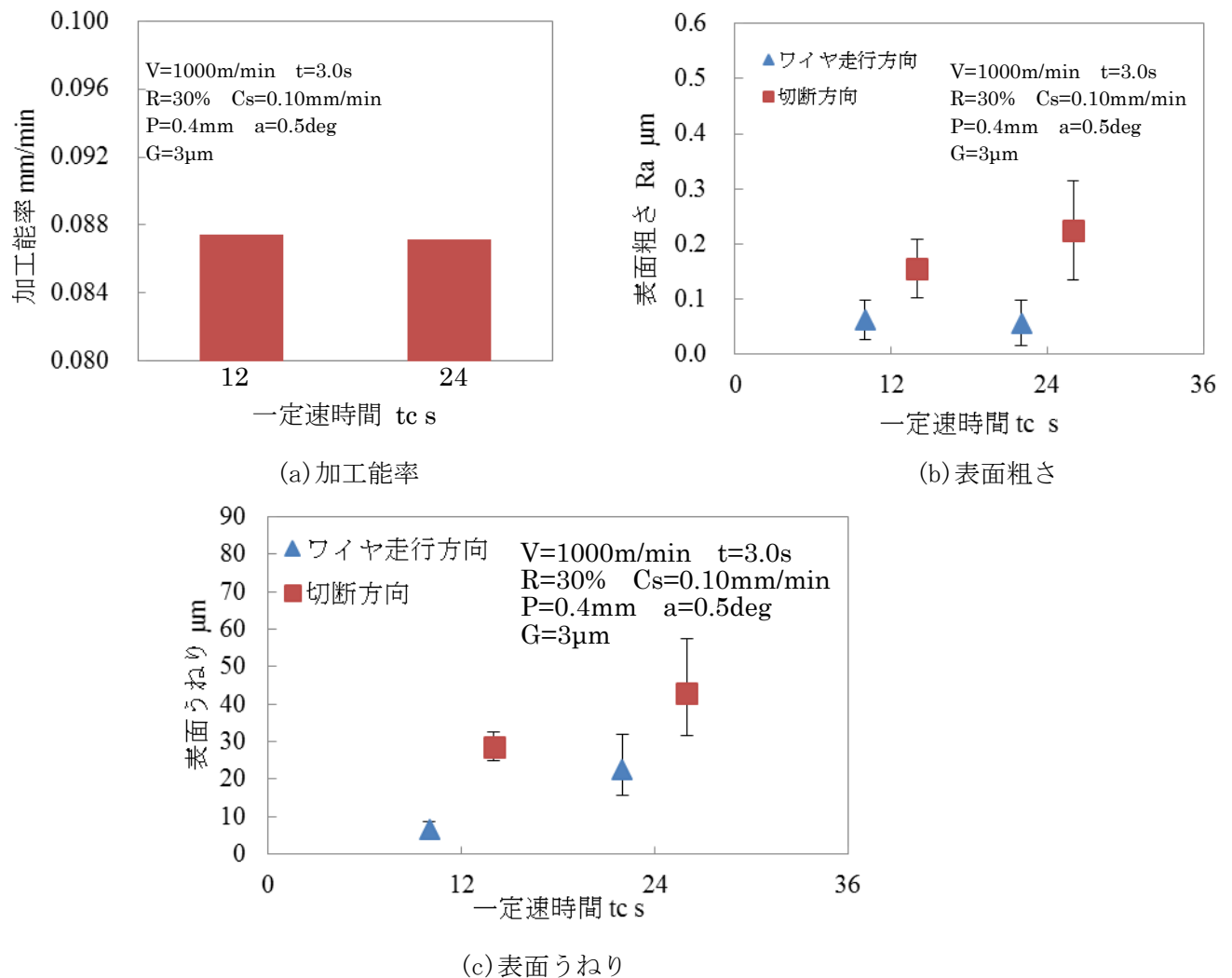


図 2-30. 一定速時間とウエハ表面性状及び加工能率の関係

を変化させても加工能率はほとんど変化がないことが明らかとなった。しかし、同図(b)より、一定速時間が長くなると表面粗さが悪化することが明らかとなった。図 2-30(c)より、一定速時間が長くなるとワイヤ走行方向、切断方向ともに表面うねりが悪化していることが分かる。

⑤ 全円ウエハのうねり特性

上述の条件を元に 2inch の SiC インゴットをスライシング加工し、そのときのウエハのうねりを測定した結果を図 2-31 に示す。同図は切断方向のウエハうねりで、C 面は $25.08\mu\text{m}$ 、Si 面は $29.06\mu\text{m}$ を示し、 $30\mu\text{m}$ を下回るウエハができた。

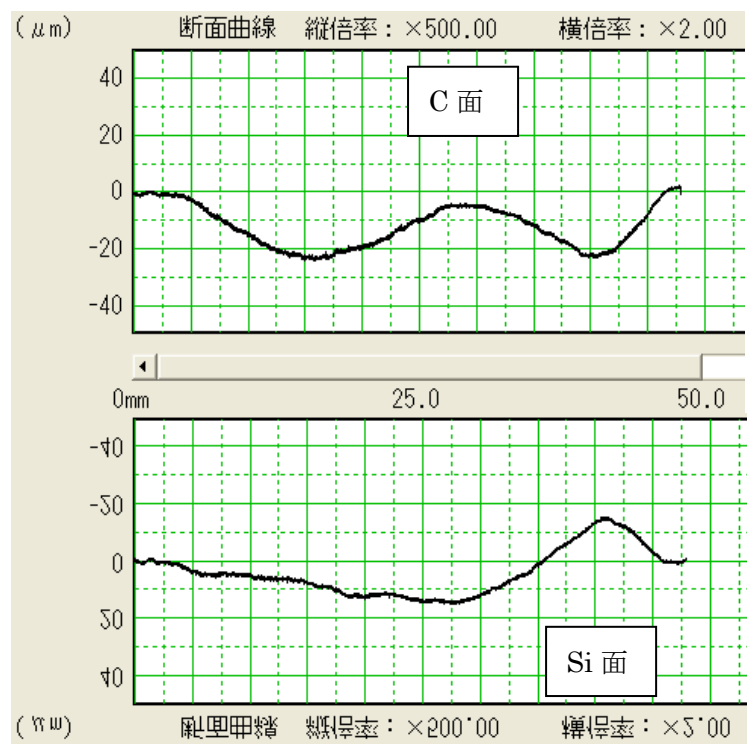


図 2-31. 2 インチウエハの切断方向の表面うねり

【3】樹脂コーティングワイヤーの断線メカニズムの解析（奈良県産業振興総合センター）

ワイヤーソーにおける課題の一つに「ワイヤーの断線」が挙げられる。本ワイヤーソーは、連続した1本のワイヤーを工具として使用する構造であるため、加工中にワイヤーが断線すると装置の運転停止を余儀なくされると共に、加工物及び装置への損傷や再段取りによる時間的ロスなど多大な損失が発生することになる。

このことから、ワイヤーの断線を発生させないことがワイヤーソーの開発にとって重要な課題であるといえる。ところが、図3-1に示すように断線を引き起こす因子は多く、またそれらは複合的に関係していると考えられる。

そこで、本研究開発ではこれまでに得られたワイヤーの破断メカニズムの知見を活用し、今回新たに取り組む樹脂コーティングワイヤーについて各種強度試験や破断面観察を行い、断線発生因子の検証とメカニズム解明について検討した。

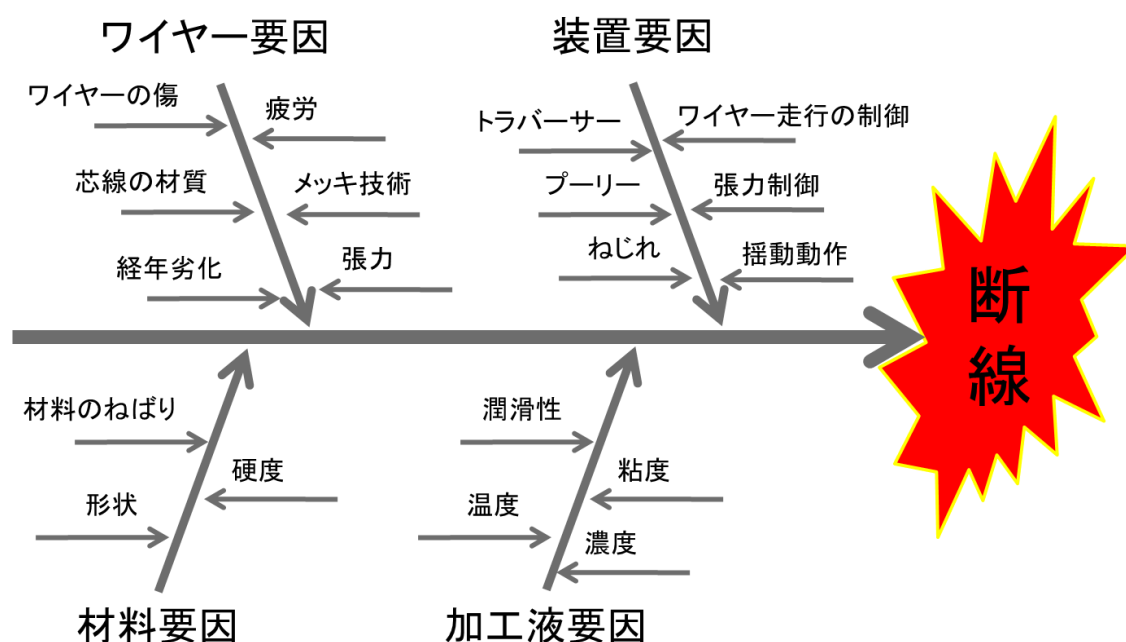


図3-1. ワイヤー断線の特性要因図

マルチワイヤーソーは、サファイアやシリコンといった半導体材料をインゴット（塊）の状態から薄板に加工する装置である。装置外観を図 3－2 に示す。ワイヤーを糸巻きのようなワークローラー上で高速で走らせ加工物を切断する機構となっている。ローラーに何重にもワイヤーを巻くことによって、一度に大量の薄板（ウェハ）を加工することができる。

またタカトリ製マルチワイヤーソーの特徴として、ワークローラーを左右に揺動させることによって加工物への当たりを変化させる揺動機能がある。ワイヤーは供給側のリールから回収側のリールまで 1 本で繋がっており、順送りと巻き戻しをおこないながら徐々に新しいワイヤーが供給される。装置の構造を図 3－3 に示す。



図 3－2．マルチワイヤーソー

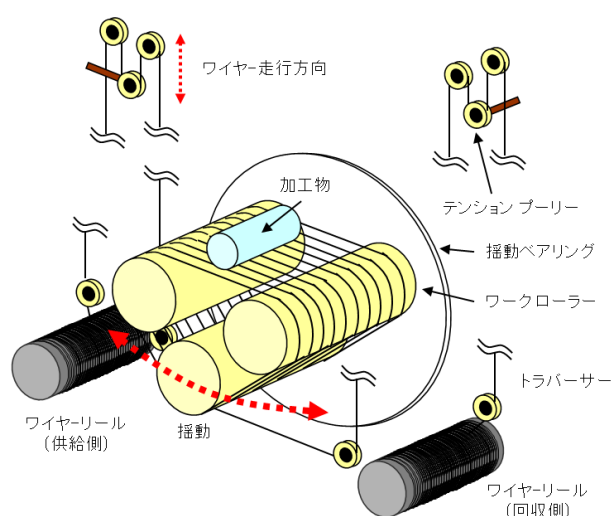


図 3－3．マルチワイヤーソーの構造

【3-1】各種条件下での破断強度評価

平成 25 年度は、樹脂コーティングワイヤーの基本的な物性を把握するために、引張試験による破断強度の測定を行った。試験に際しては、インストロンジャパンカンパニイリミテッド社製の 5565 型機械的強度測定装置を使用した。測定装置を図 3－4 に示す。また、ワイヤーを固定する際には、同社の W-5074M 型ワイヤー固定治具を用いた。本治具の外観を図 3－5 に示す。

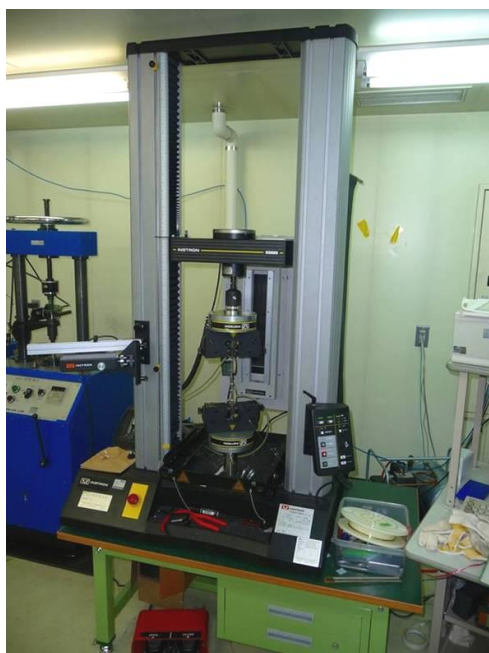


図 3-4. 機械的強度測定装置



図 3-5. ワイヤ固定治具

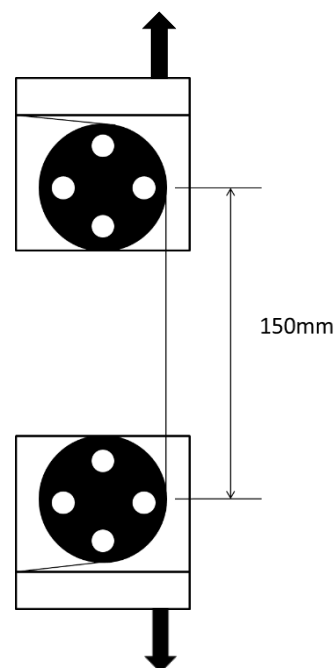


図 3-6. 試験モデル

試験条件は、図 3-6 に示す通り治具のプーリー間隔を 150mm、引張速度 10mm/min とし、樹脂コーティングワイヤー（芯線径 0.12mm）の破断荷重を計測した。

更に計測結果と固定砥粒式のワイヤーソーで一般的に利用されている同径のダイヤモンドワイヤー 2 種の引張試験結果とを比較し、樹脂コーティングワイヤーの引張強度について検証を行った。

図 3-7 に引張試験結果を示す。樹脂コーティングワイヤーと同径のダイヤモンドワイヤーの破断荷重を比較すると、樹脂コーティングワイヤーの破断荷重はダイヤモンドワイヤーよりも低いことが分かった。これは芯線の違いも想定されるが、大きくはワイヤーを覆っているメッキ層と樹脂層の強度が関係していると考えられる。ダイヤモンドワイヤーはダイヤモンド砥粒を厚さ $20\mu\text{m}$ の Ni 電着メッキで固定しているため、そのメッキ層自体も強度を担っている。一方、樹脂コーティングワイヤーは樹脂の層が厚さ $5\mu\text{m}$ と薄く、また樹脂の強度も Ni メッキ層よりも小さいことから、樹脂層が担う強度はほとんどない。そのため、ダイヤモンドワイヤーに比べて破断荷重が小さくなると考えられる。

次に、ワイヤーの断線要因の一つと考えられる「ワイヤーのねじれ」が断線に及ぼす影響について検証を行った。ワイヤーを試験機に固定後、ワイヤーにねじりを加えた状態で引張試験を実施した。ねじりを加えるに当たっては、ワイヤーに 20N の張力を負荷した状態で行った。

ねじり回数とワイヤーの破断荷重との関係を図 3-8 に示す。ねじり回数の増加に伴い、破断荷重は明らかに低下する傾向が認められた。これは、ねじることによってワイヤーに対して平行方向のせん断応力が加わり、その分垂直応力である引張破断荷重が低下したと考えら

れる。ただし、今回行った樹脂コーティングワイヤーを治具に固定してねじる試験方法では、ワイヤーがプーリー上で滑りやすく、標点間のみでねじることが困難であった。従って、引き続きねじれの影響について検討を続ける。

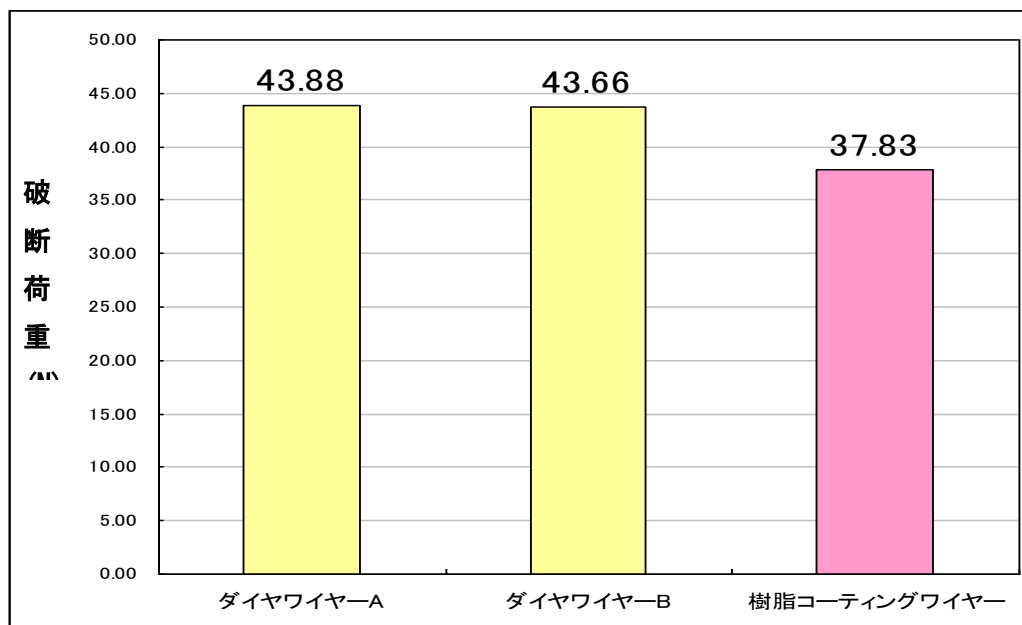


図 3 - 7 . 引張試験結果

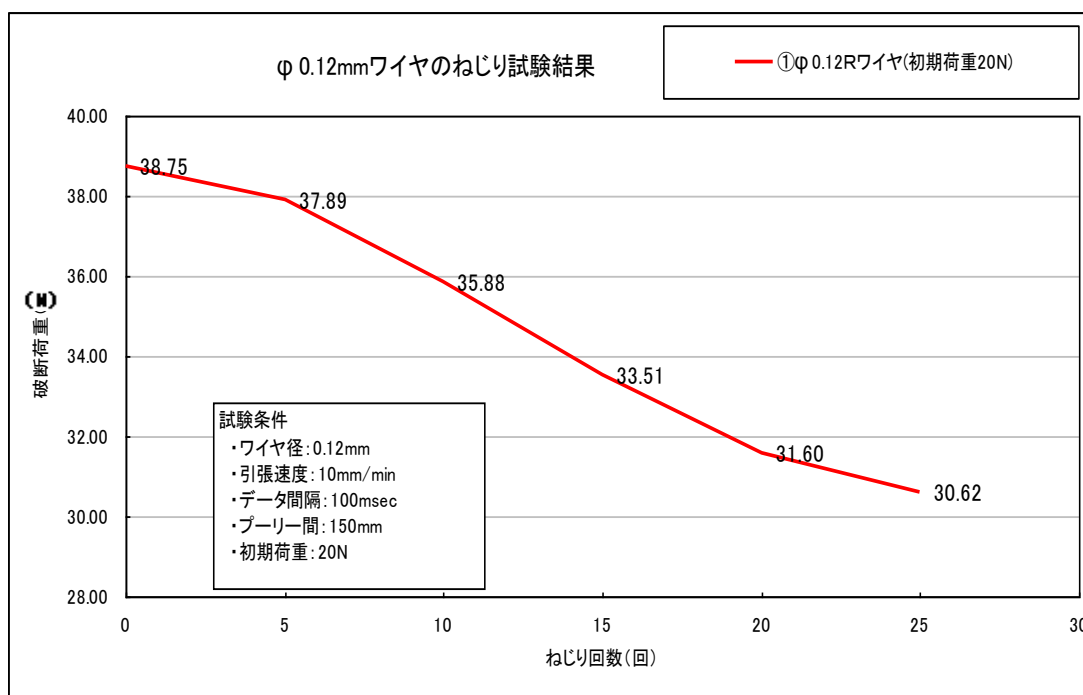


図 3 - 8 . ねじり回数と破断荷重

平成 26 年度は、「曲げ」による破断荷重への影響を確認するために実験を行った。マルチワイヤーソーは、その構造上、ワイヤーが各種プーリー、ワークローラー、ワイヤーリールに巻かれており、装置内でワイヤーが走行する向きが変化する。その際、ワイヤーには図 3－9 のような「曲げ」の力が働いていると考えられる。

マルチワイヤーソーにワイヤーを取り付け、加工物を設置しないままワイヤーを走行させる「空運転」を一定条件のもとで行い、プーリー、ワークローラー、ワイヤーリールで曲げられたワイヤーのサンプルを作成した。サンプルの作成条件を表 3－1 に示す。また、空運転サンプルの比較用として未使用のワイヤーと使用済みのワイヤー 2 種類（使用後にリールに回収されたワイヤー、及び使用中に断線したワイヤー）を用意した。

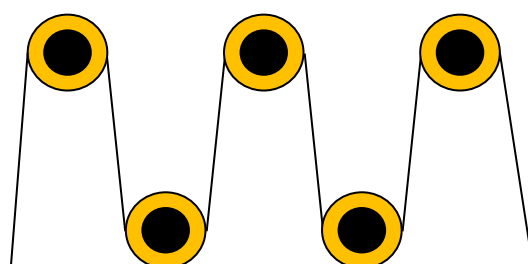


図 3－9．ワイヤーの「曲げ」のイメージ図

表 3－1．空運転サンプルの作成条件

No.	種類	状況	ワイヤー 線速	ワイヤー 加減速時間	ワイヤー 供給量	ワイヤー 一定速時間	テーブル 切込量	ワイヤー 張力
1	樹脂コーティングワイヤー (φ 0.12mm)	未使用	—	—	—	—	—	—
2		空運転	1000m/min	3.0sec	1.0m/min	12.0sec	1.0mm	20N
3							2.0mm	
4						6.0sec	1.0mm	25N
5								
6						18.0sec	1.0mm	20N
7		使用済	1000m/min	3.0sec	1.0m/min	12.0sec	50mm	20N
8		断線後						

表 3－1 のサンプルについて引張試験を実施し、装置を運転した際に生じるワイヤーに対する「曲げ」の破断荷重への影響について検証を行った。引張試験に際しては、インストロンジャパンカンパニイリミテッド社の機械的強度測定装置 5582 型を使用した。引張試験の結果を図 3－10 に示す。

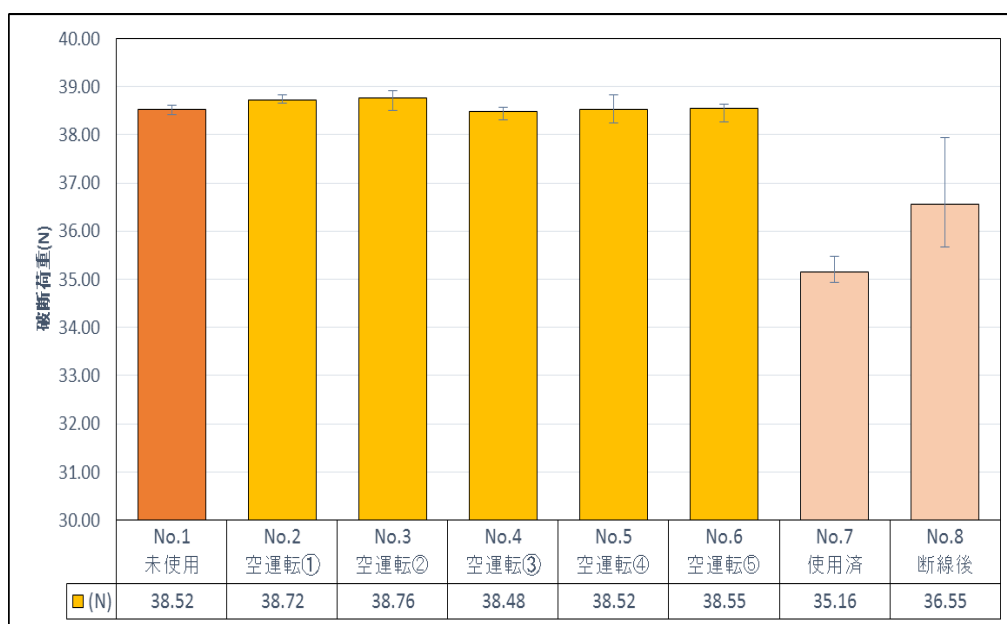


図 3－10．空運転サンプルの引張試験結果

未使用のワイヤーと空運転を行ったワイヤーの試験結果を比較すると、破断荷重に変化は見られなかった。そのため、プーリー等による曲げやねじりが、樹脂コーティングワイヤーの破断荷重に及ぼす影響は少ないと考えられる。しかし、使用済みのワイヤーにおいては破断荷重の低下が確認された。使用済みワイヤーの直径を計測すると、未使用や空運転のワイヤーに比べ細くなっており、断面積の違いが破断荷重に影響したと考えられる。

【3-2】ワイヤー破断面解析

平成 25 年度は、【3-1】の引張試験で破断したワイヤーの破断面を電子顕微鏡にて観察した。また、ワイヤーの破断面付近の側面についても観察を実施した。

図 3－11 に破断部の電子顕微鏡写真を示す。破断面はカップアンドコーン型の形状を呈しており、その中心部にディンプル(小さなくぼみの集合体)が確認できる。この破断面形状から、延性破壊であると推察される。ただし、ねじりの有無による破断面の形状には大きな差異は認められなかったことから、破断面からねじりの影響を確認することはできなかった。

一方、図 3－12 に示した破断箇所のワイヤー側面では、ねじりの有無により明らかな差異が認められた。すなわち、ねじりを加えないワイヤーの破断部に見られる筋状痕がワイヤーの軸方向と平行であるのに対し、ねじりを加えたワイヤー破断部に見られる筋状痕は円周方向に傾斜があることが分かった。さらに、ねじり回数の増加に伴って傾斜が顕著になることが分かった。このことから、破断部付近のワイヤー側面を観察することで、ねじりがワイヤーに及ぼしている影響の大きさを確認できると推察される。

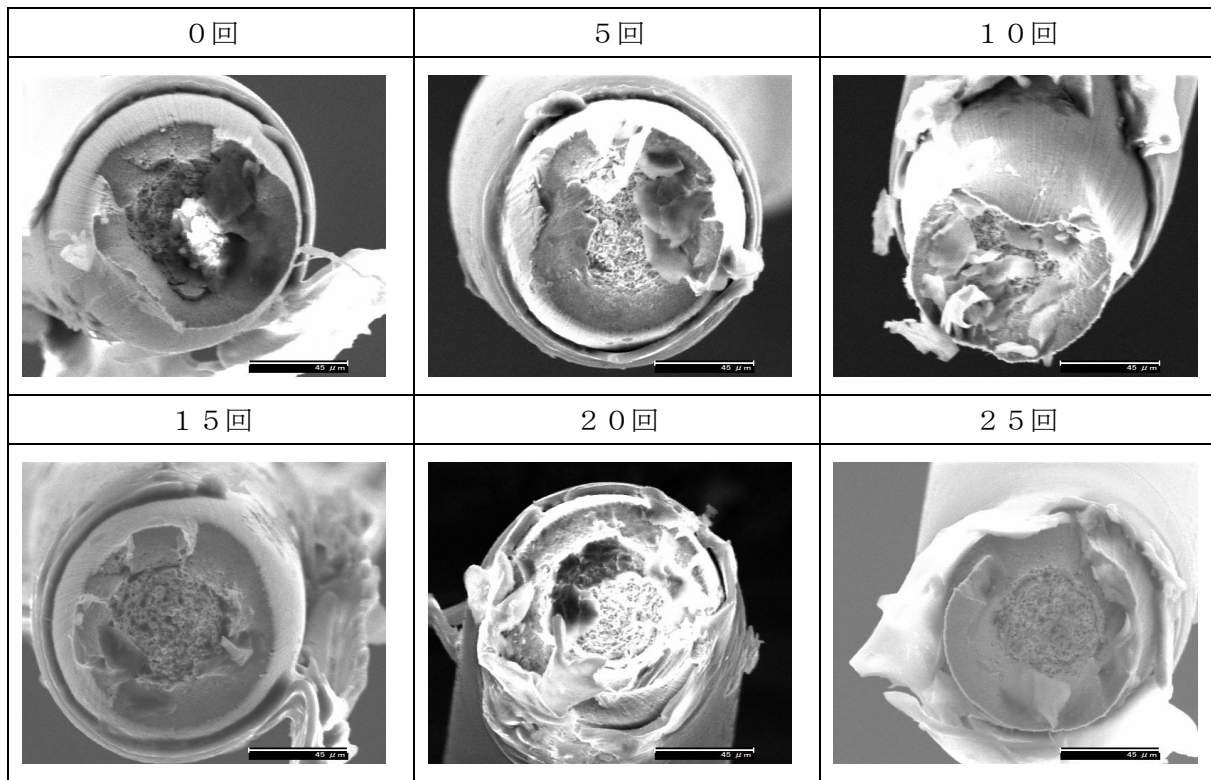


図 3 - 1 1. ワイヤの破断面

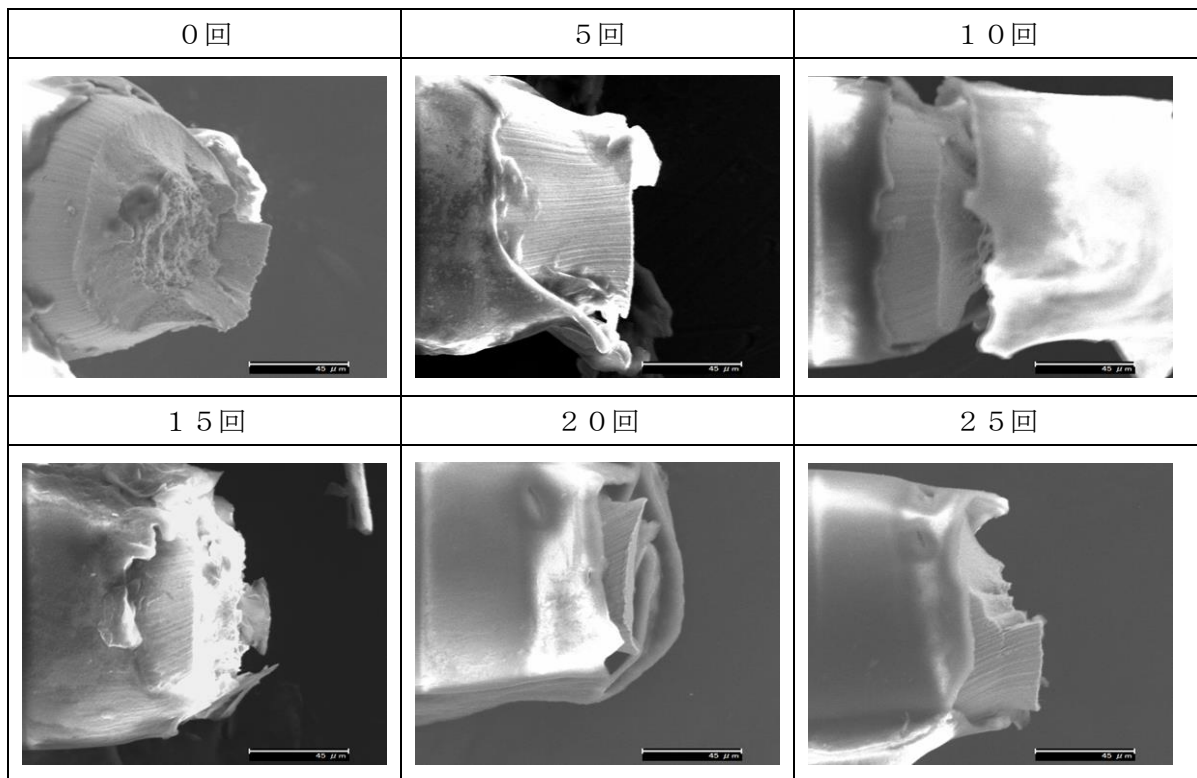


図 3 - 1 2. ワイヤの破断面付近の側面状態

平成 26 年度は、次項で述べる疲労試験後のワイヤーの破断面の観察を行った。なお、疲労試験において断線しなかったワイヤーについては、疲労試験後に引張試験機によって破断させた。疲労試験後に引張試験機で破断させた破断面を図 3-13、疲労試験中に断線した破断面を図 3-14 に示す。疲労試験の条件として、ワイヤーに平均荷重として 20N の張力を与えた状態から 12N の張力振幅を与えた。一方は繰り返し数 1000 回で打ち切ったが、もう一方は破断に至るまで疲労試験を継続した。

図 3-13 を見ると、中心部に延性の破断面の特徴であるディンプルと呼ばれるくぼみが集中していることが確認できる。これは疲労試験を行っていないワイヤーの引張試験後の破断面と同じ様相である。しかし、図 3-14 を見ると、ディンプルの集中は見られず、一部に波状の模様や亀裂を確認した。この波状の模様はセメンタイト組織と考えられている。セメンタイトは硬くて脆い組織であるため、疲労によりそのぜい弱な部分に割れが生じたと考えられる。このような破断様相を確認することで、ワイヤーが疲労で断線したかを判別することが可能になる。

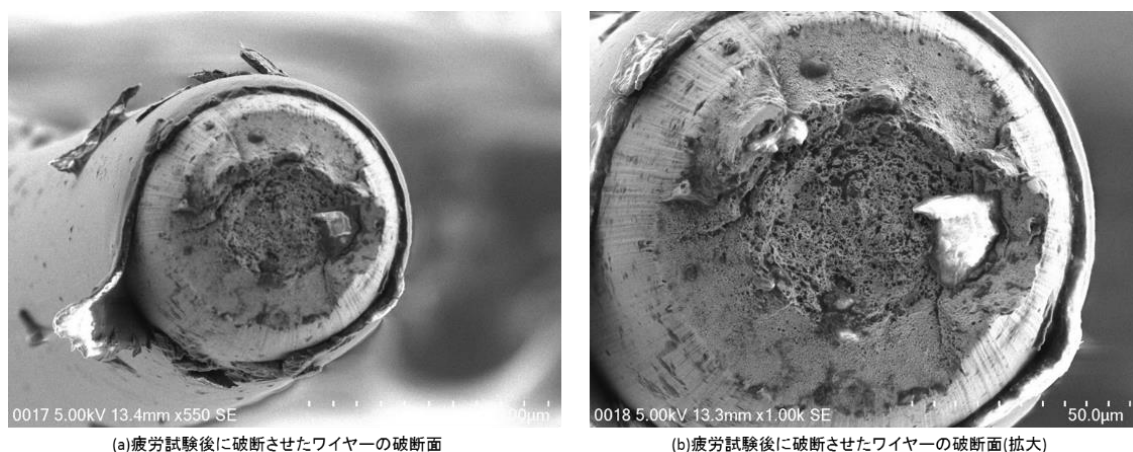


図 3-13. 疲労試験後に引張試験で破断させたワイヤーの破断面

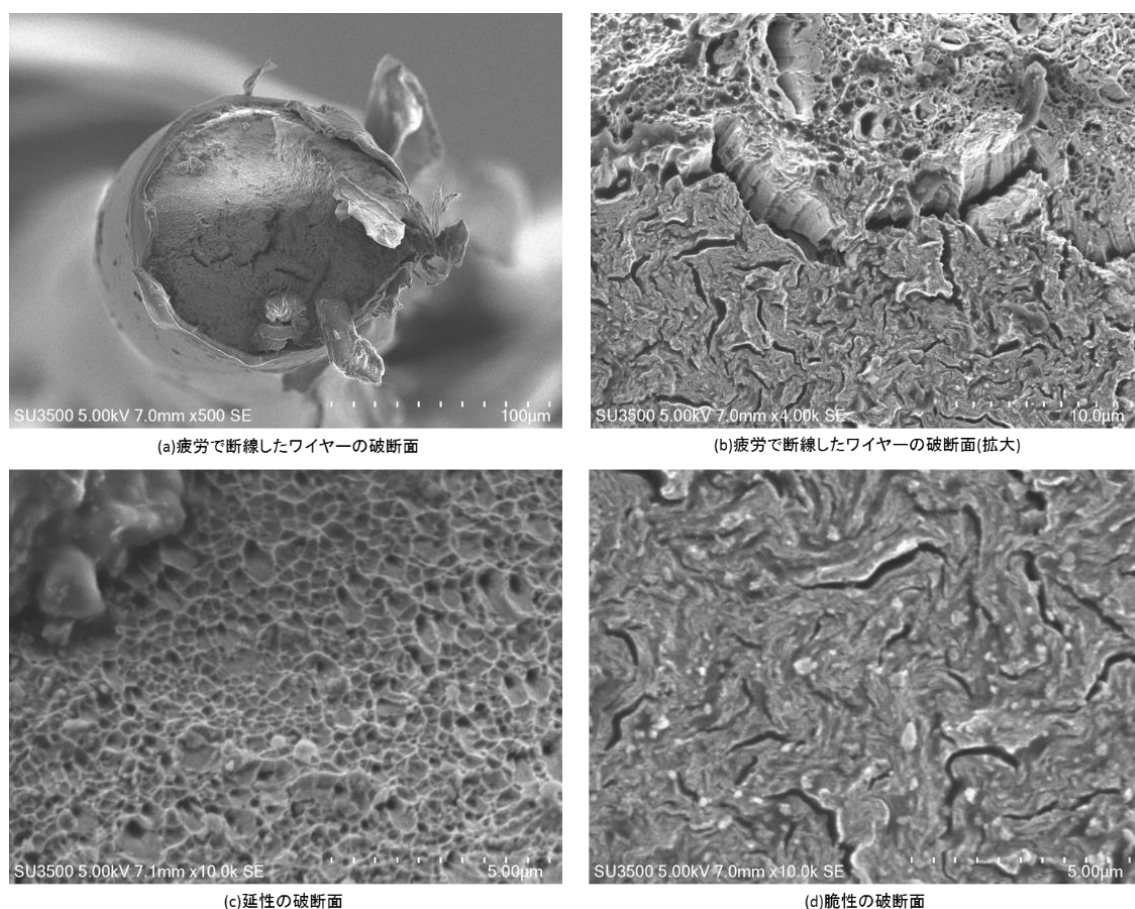


図 3－1 4．疲労試験中に断線したワイヤーの破断面

【3-3】限界使用条件の評価

平成 26 年度は、図 3－1 に示したワイヤー断線の特性要因図の中から、張力の変動による「疲労」に着目した。具体的には、疲労が破断荷重に及ぼす影響を把握するために樹脂コーティングワイヤー(芯線径 0.12mm)に対し疲労負荷の後、引張試験を行った。疲労試験に際しては、インストロンジャパンカンパニイリミテッド社の電磁式疲労試験装置 E10000 型を使用した。(図 3－1 5 参照)。また、ワイヤーの固定に関しては、同じくインストロンジャパンカンパニイリミテッド社のワイヤー固定治具 W-5074M を用いた。(図 3－1 6 参照) 疲労試験によるサンプル作成条件は、治具の間隔を 100mm とし、ワイヤーへの平均荷重および振幅を表 3-2 に示した条件に設定した。試験時の周波数を 0.1Hz とし、試験打ち切り繰り返し数を 1000 回とした。

上記方法で作成した疲労ワイヤーサンプルを引張試験にて破断させ、その際の破断強度を確認した。その結果を表 3-3 に示す。



図 3-15. 電磁式疲労試験

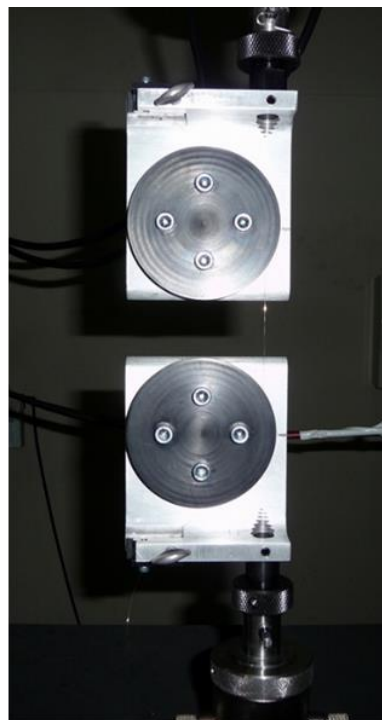


図 3-16. ワイヤ固定治具

表 3-2. 疲労ワイヤー作成条件

張力(N)	振幅(N)						
	±2.5	±5	±7.5	±10	±12.5	±15	±17.5
20	○	○	○	○	○	○	○
25	○	○	○	○	○	—	—
30	○	○	○	—	—	—	—

表 3-3. 疲労ワイヤーの引張試験結果

張力(N)	振幅(N)						
	±2.5	±5	±7.5	±10	±12.5	±15	±17.5
20	37.82	37.79	37.85	37.84	37.58	37.85	×
25	37.89	38.06	37.94	37.75	37.90	—	—
30	38.04	38.66	38.66	—	—	—	—

※数字の単位は(N)、×は疲労回数が 1000 回未満で断線

結果として、各張力において張力振幅を変更しても破断荷重の変化は確認されず、蓄積疲労による破断荷重への影響は低いことが分かった。

ただし、 $20 \pm 17.5\text{N}$ の場合のみ、1000 回未満で断線した。これは最大振幅が破断荷重とほぼ同じであるため、試験荷重が許容値を超えたと考えられる。そこで、張力 20N において振幅を変動させ、断線に至るまで疲労試験を継続した。その結果を表 3－4 に示す。

表 3－4．断線に至る疲労回数

張力(N)	振幅(N)				
	±10	±12	±13	±14	±15
20	○	2,640	4,137	2,534	1,608

※「○」は 20000 回で断線せず。

振幅が 10N 以下では断線は確認されなかったが、12N を超えると最大振幅が破断荷重以下でも断線することが確認された。そのため断線の予防のためには、振幅すなわち張力の変動を抑える必要があるといえる。

【3-4】ワイヤー断線についての実機評価・検証

平成 26 年度は、ワイヤーの断線について、装置が要因となっているものについて実機を用いて検証を行った。

(1) プーリーの摩耗状況の観察

従来のダイヤワイヤーを用いたワイヤーソーでは、プーリーの偏摩耗が断線要因の 1 つとして挙げられている。プーリーとワイヤーの間に速度差が生じることですべりが発生し、図 3－17 のようにプーリーの溝が左右非対称に削られる。(偏摩耗) ダイヤワイヤーを用いたワイヤーソーでは、その溝をプーリーが走行することで、ワイヤーがねじられ、断線に至ると考えられている。

平成 26 年度の研究開発では、このような偏摩耗が樹脂コーティングワイヤーにおいても発生しているかを確認した。

確認の手順について述べる。まず、未使用のプーリーの溝形状を測定する。次にワイヤーとプーリーを取り付けた状態で装置の空運転を実施し、空運転後のプーリーの溝形状を測定する。これらの測定結果から、未使用のプーリーの形状と空運転後のプーリーの形状とを比較し、ワイヤー走行による樹脂コーティングワイヤーにおける偏摩耗の発生を確認する。なお、形状の測定は図 3－18 に示す Steinbichler Optotechnik 社製の非接触三次元座標測定機 COMET5 11M を使用した。

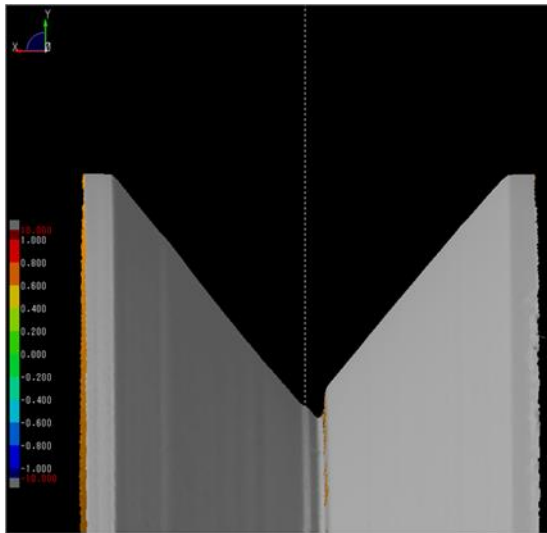


図 3-17. プーリーの偏摩耗状況



図 3-18. 三次元座標測定機

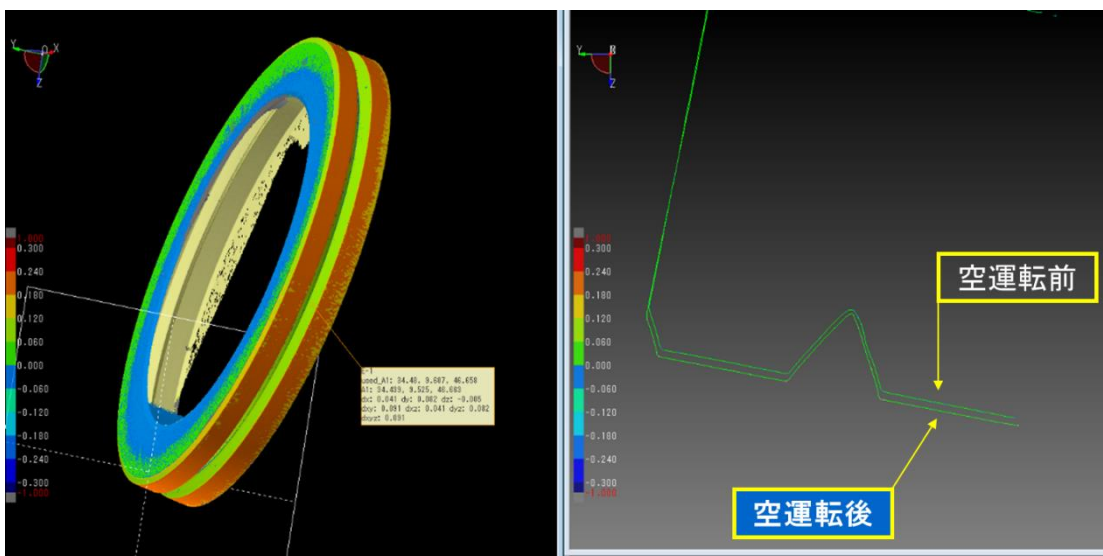


図 3-19. 形状測定結果

測定結果を図 3-19 に示す。図 3-19 の左側は空運転前後の形状の差異を色で表現したものであり、右側は溝部分の断面図を拡大したものである。図 3-19 右側を見れば分かるように、空運転前後での溝形状の変化は確認できなかった。つまり、装置の空運転によってプーリーの偏摩耗は発生しなかった。したがって、樹脂コーティングワイヤーがプーリーの溝を走行するだけではプーリーの偏摩耗は発生せず、プーリーの摩耗量もわずかであると考えられる。

その一方、測定結果からプーリーの外径が変化しており、全体として膨張していることが分かった。プーリーが膨張した原因として、ワイヤーソーで用いられる加工液がプーリーに浸み込んだことが考えられたため、以下の 2 つの実験を行った。

- ①ワイヤー走行２００時間後のプーリーの取り付け状態の確認
- ②プーリーを加工液に浸し、２４時間後、４８時間後、７２時間後に形状測定

①ワイヤー走行２００時間後のプーリーの取り付け状態の確認

ワイヤー走行２００時間後のプーリーの取り付け状態は図３－２０のようになっていた。その拡大図を図３－２１に示す。図３－２０と図３－２１を見るとプーリーの軸とプーリーとの間に隙間がある。この隙間はワイヤー走行前には見られなかったことから、２００時間のワイヤー走行中にプーリーのはめ込みが緩くなったと考えられる。



図３－２０．２００時間走行後のプーリー取り付け状態 図３－２１．隙間部拡大

②プーリーを加工液に浸し、２４時間後、４８時間後、７２時間後に形状測定

ワイヤーソーに使われる加工液を満たした容器を用意し、その容器内に、トラバーサー用プーリーと、テンションプーリーを入れる。入れた後、２４時間経過後、４８時間経過後、７２時間経過後にプーリーの外径と内径を測定する。測定結果を表３－５、表３－６に示す。ここで、表３－５はトラバーサー用プーリーの測定結果を示し、表３－６はテンションプーリーの測定結果を示す。

表３－５．トラバーサー用プーリーの測定結果

	0時間後	24時間後	48時間後	72時間後
外径 [mm]	113.65	113.72	113.76	113.76
内径 [mm]	25.78	25.82	25.82	25.82

表 3－6．テンションプーリーの測定結果

	0時間後	24時間後	48時間後	72時間後
外径 [mm]	76	76.07	76.11	76.11
内径 [mm]	55.65	55.73	55.76	55.76

表 3－5 から、トラバース用プーリーの内径と外径はともに膨張しており、72 時間後には膨張が止まっていることが分かる。膨張量は外径で 0.11 mm、内径で 0.04 mm である。表 3－6 から、テンションプーリーも同様に内径と外径はともに膨張しており、72 時間後には膨張が止まっている。また、膨張量は外径で 0.11 mm、内径で 0.11 mm である。測定機の精度が 0.02 mm であること、及び、測定においてプーリーにスプレーを塗布したことによる誤差を考慮しても、両方のプーリーの外径は 0.1mm 程度膨張したと考えてよい。

現時点において、プーリーが膨張した原因をプーリーの材質にあると考えている。装置で使用されているプーリーの材質はウレタンで、ウレタンの種類の中には水分を吸い込み、加水分解されて劣化するものがある。ワイヤーソーで使われているプーリーも加工液の水分や油分を内部に吸い込み、膨張した可能性が高い。また、その他の原因として永久ひずみも考えられる。

プーリーが膨張することを確認できたが、プーリーの膨張が断線の原因であるのか検証していない。しかし、プーリーの膨張量が装置内で用いられているすべてのプーリーで同一とは限らないため、プーリーの膨張によってワイヤーが、設計上、意図した経路を走らない可能性があり、それが張力への影響を及ぼすことも考えられる。また、プーリーの膨張量のばらつきが張力のばらつきに影響を与えることも考えられる。したがって、プーリーの膨張は断線に影響すると考えられ、現在の加工液とプーリーの材質から、ウレタンに浸み込まない加工液または加工液が浸み込まないプーリーの材質に変更する必要がある。例えば、プーリーがワイヤーの走行によって摩擦しないことが確認されたので、プーリーをアルミなど軽量の金属でできたものに交換することも効果的であると想定できる。

(2) ワークローラーの変位の観察

マルチワイヤーソーでは図 3－2 2 に示すワークローラーに何重にもワイヤーを巻き付けるため、ワークローラーには絶えず内向きの負荷がかかっていると考えられる。その内向きの負荷により、ワークローラーが偏心している可能性がある。鏡面加工のためには、装置の安定した挙動が不可欠であり、実機においてワークローラーがどのような挙動を示しているのか把握することが重要となる。そこで、図 3－2 3 に示す株式会社キーエンス製のレーザー判別センサ IL-S025 他を用いて回転中のワークローラーの変位測定を行い、その測定によってワークローラーの挙動を把握できるか検討

を行った。

測定対象は表 3－7 のとおりとし、各サンプルに対しワイヤー線速を変化させ、各線速におけるローラーの変位を測定した。

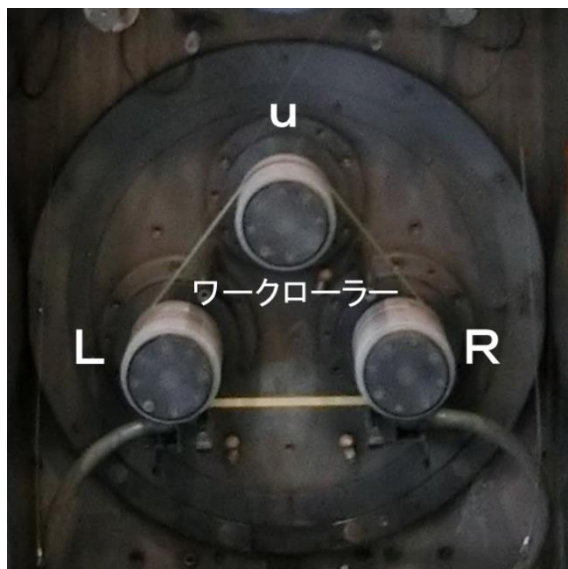


図 3－2 2．ワークローラー



図 3－2 3．レーザー判別センサ

表 3－7．変位測定対象

名称		直径	長さ	備考
①-1	ワークローラー1(L)	92.5mm	115mm	複数テストカット済、再溝加工済
①-2	ワークローラー1(u)	92.5mm	115mm	複数テストカット済、再溝加工済
②	ワークローラー2(L)	97.5mm	115mm	未使用品
③	ガイド	15mm	229mm	比較用

サンプル①は複数回テストカットに使用した上で溝の再加工を行っているワークローラーである。Lはモーターにより駆動するが、uは従動側となっている。サンプル②は未使用のワークローラーであり、サンプル①との比較のため測定し

た。また装置全体の振動が測定に影響するかを確認するため、装置に固定されているガイドの変位測定も行った。

変位測定におけるワイヤー線速の加減速設定を、線速 0mm/min から 3 秒間の加速、その後一定速度を 12 秒間だけ保ち、3 秒間で 0mm/min まで減速するとした。なお、ワイヤーが走行している 18 秒間を測定する。本研究では、条件として一定速度となる線速を取り上げ、一定速度となる線速を変えてワイヤーの加減速設定を行い、

その設定条件ごとに測定を行う。一定速度となる線速を、5m/min、及び100m/minから1000m/minまで100m/min刻みで設定する。測定の結果を、図3-24、図3-25、図3-26及び図3-27に示す。

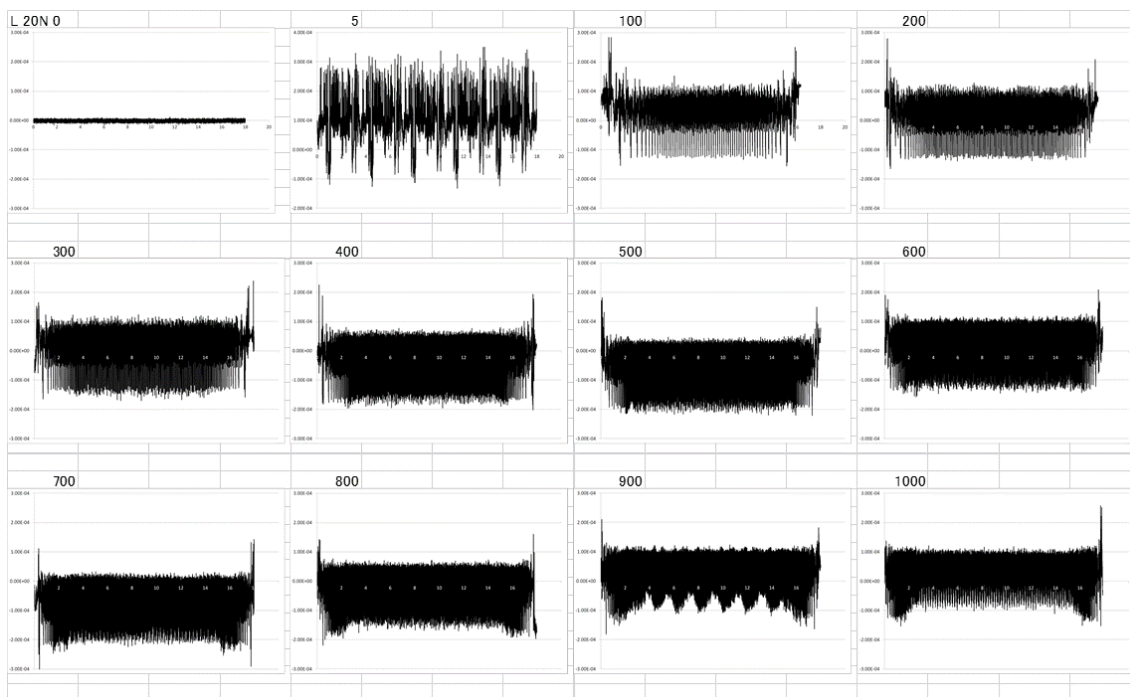


図3-24. ①-1 ワークローラー1 (L)の測定結果

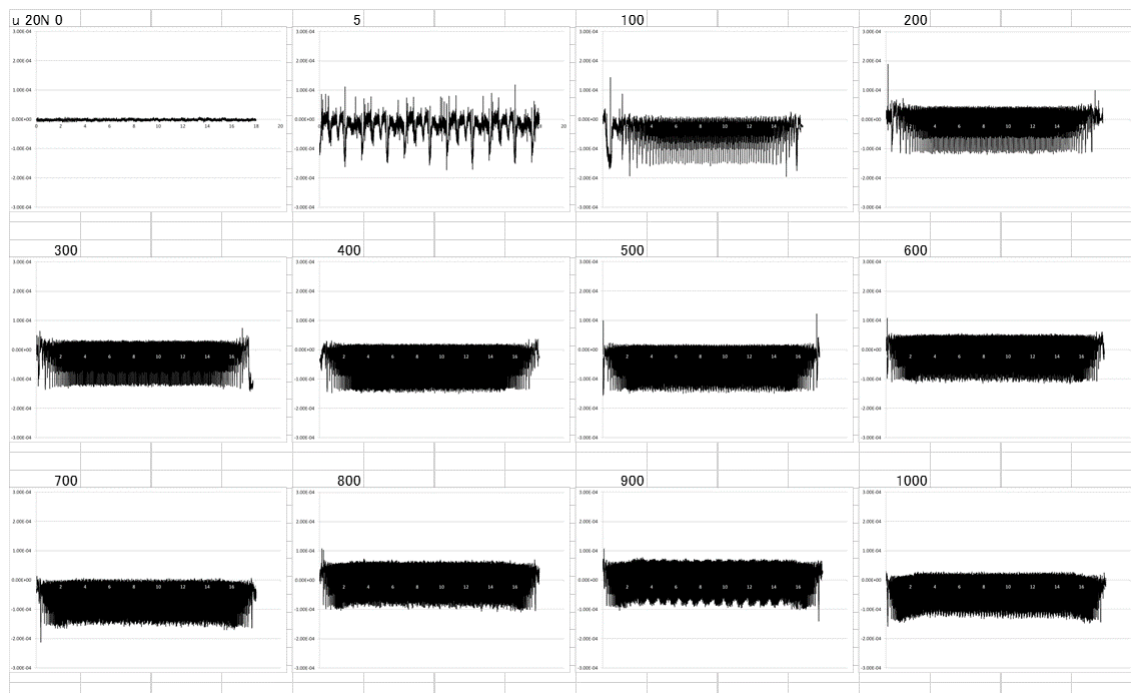


図3-25. ①-2 ワークローラー1 (u)の測定結果

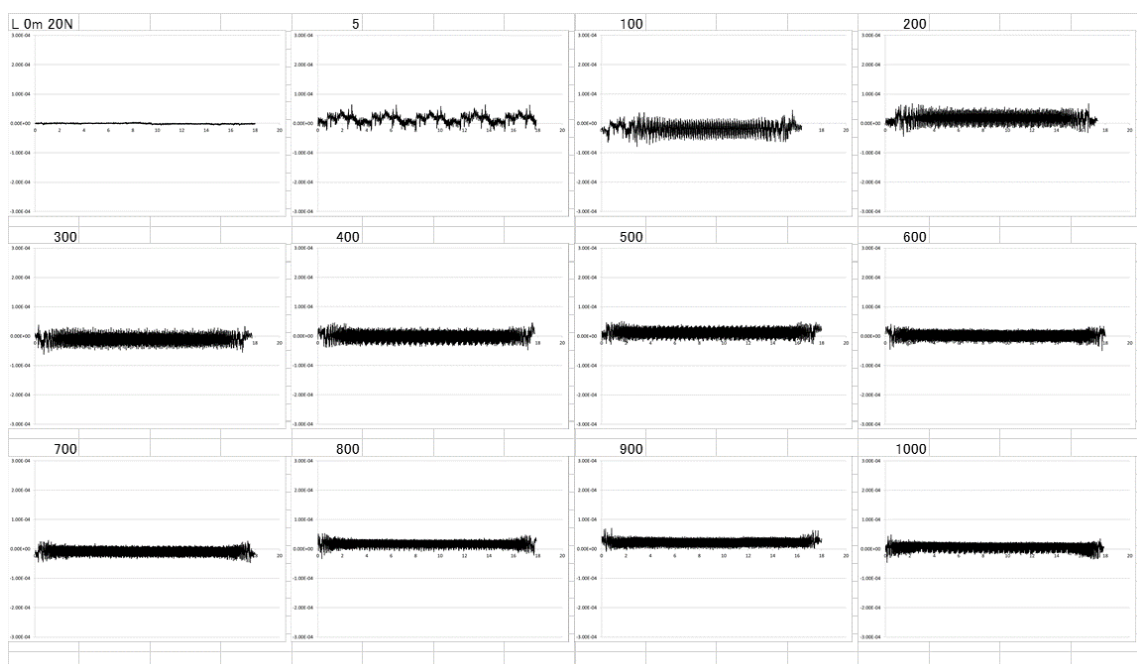


図 3-26. ②ワークローラー 2 (L) の測定結果

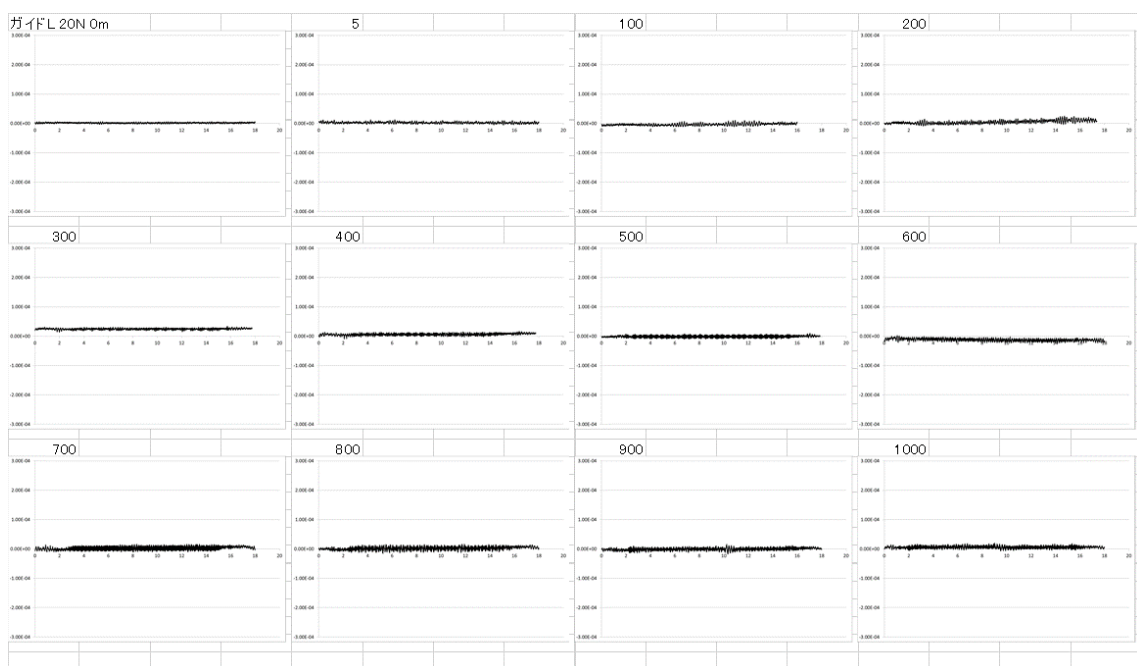
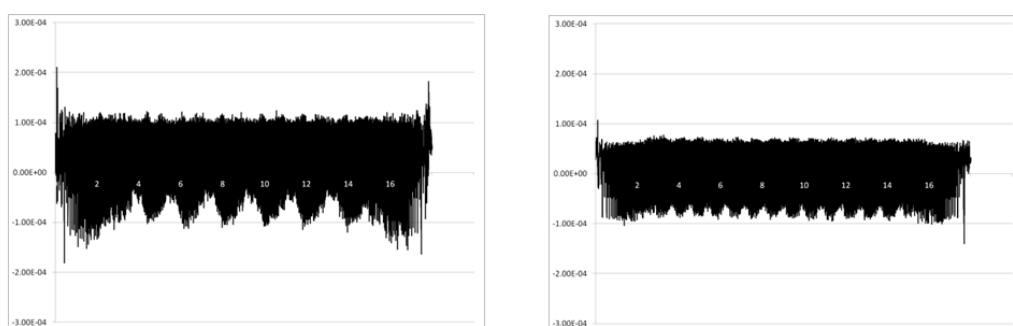


図 3-27. ③ガイドの測定結果

測定結果を見ると、②未使用ローラー、③ガイドに比べて、①使用済ローラーの変位が大きいことが分かる。これは線速が 5 m/min の低速時にも変位が大きいことから、ローラーの使用による傷や汚れも原因の 1 つだと考えられる。

使用済みのローラーに着目すると、ワイヤー線速の加速、減速時に変位が大きくなっていることが分かる。この現象は駆動側であるワークローラー 1 (L)の方が、従動側であるワークローラー 1 (u)よりも顕著に発生しているため、モーターによる影響が考えられる。

またそれぞれのローラーで特徴的な振れが確認できた。図 3-28 に示すように、特定のワイヤー線速時に変位の振れが大きくなる現象を確認した。これらの特異な振れがワイヤーの断線や、加工精度に影響するかは、今後検証が必要である。



ワークローラーL(φ92.5mm) ワークローラーu(φ92.5mm)
(900m/min) (900m/min)

図 3-28. 特異な振れ

【4】 試作機の開発 (株式会社タカトリ)

目次には 1～4 とテーマを設定したが、各内容を切り分けて記載することが困難であった。そのため、試作機の開発という枠組みで本項に関しては記載する。

(1) 高線速化対応

図 4-1 の実験機によるテスト結果から、高線速化による樹脂コーティングワイヤーの切断能力及び鏡面等の加工品質の向上がみられた。このことから、従来機 (MWS-44SN) をベースとした高線速仕様の試作機の開発を進めた。試作機の完成写真を図 4-2 に示す。当初は、ランニングコスト低減のために低消費電力を行なうことを計画していたが、高線速によるメリットを追及する方向で開発を進めた。



図 4-1. 実験機(MWS-21)



図 4-2. 試作機
(MWS-44SN 線速 1000m/min 仕様)

(2) ワークローラー機構の設計

高線速への対応として、ワークローラー部ではギア比の変更をおこなった。さらに、高線速の際にワークローラーを安定して動かすために駆動用のベルトの形状変更をおこなった。図 4-3 のように設計変更を行ったことにより線速 1000m/min での長時間走行（40 時間：3 インチ切断）が可能になった。



図 4-3. ベルト周辺部の写真

(3) トラバーサの設計

従来機のトラバーサ(リールへのワイヤーの巻きつけ機構)では、線速 1000m/min で走行させるとワイヤーの巻きつけ動作が正確に実施されなかった。具体的には、巻きつけ動作が正確に実施されないことで従来の場合、プーリーへのワイヤーの掛りが少ないためプーリーからワイヤーが外れる現象が多く発生した。その影響で、図 4-4 に示すようなワイヤーの損傷が発生も確認された。理由として、トラバーサ機構へのワイヤーの掛り方(接地長さ)によるものと評価実験でわかった。従来機のトラバーサ機構と試作機のトラバーサ機構を図 4-5 に示す。そのため、試作機では赤四角で示したように形状を変更することにした。結果として、高速走行時にワイヤーがプーリーから外れる現象の低減が確認出来た。このことから、高線速化に向けては、トラバーサ機構へのワイヤーの掛りを増やすことが重要であるという知見を得た。



図 4-4. プーリーの傷

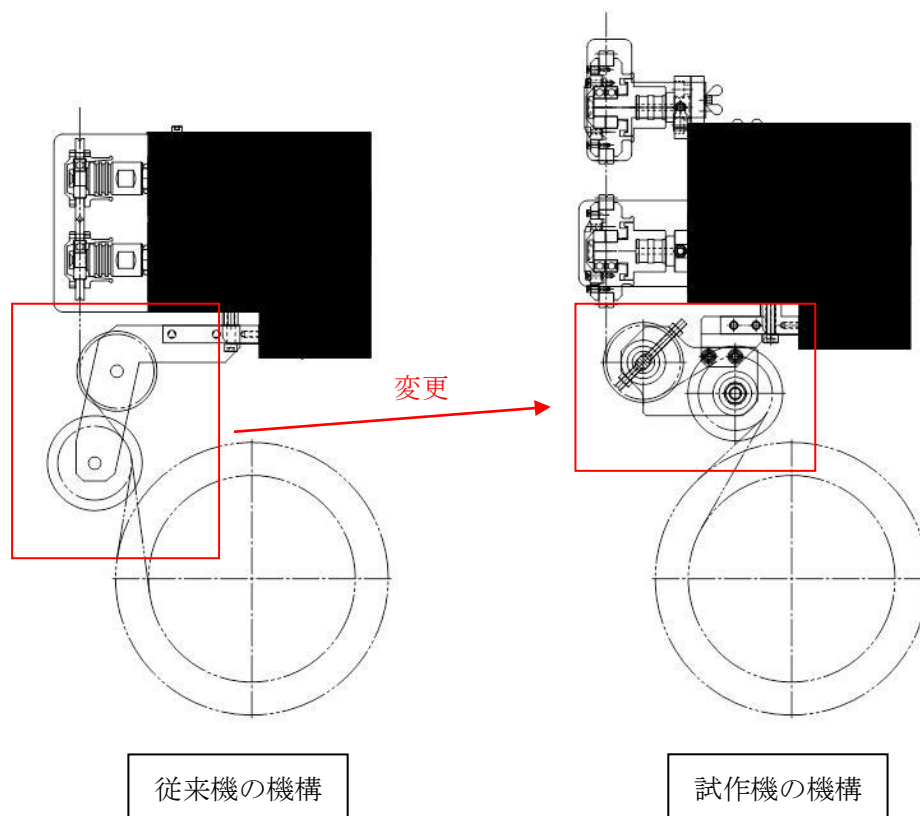


図 4-5. 従来機と試作機のトラバーサ機構

(4) プーリー機構の設計

従来機では、プーリーが高速回転するという条件下で切断をおこなうことが装置の仕様上なかった。そのため、比較的簡便なベアリングを使用していた。しかし、ワイヤーの高速走行を可能にするうえでベアリングの種類および形状の検討をおこなった。結果、高速回転においてラジアル方向のブレが問題になることがわかった。そこでラジアル方向のブレの少ないベアリングを選定しプーリー機構の設計をおこなった。また、ベアリングの回転数を減らし寿命を持たすことを期待してプーリーの形状を変更した。さらに、プーリーを大きくすることで、ワイヤーとの摩擦によるプーリーの摩耗低減も期待した。

(5) 加工液の流れの最適化

試作機を製作するにあたり、スライシングテストで問題になっている加工液流れの可視化を行った。まず、三次元CADでノズルのモデルを作成。作成したモデルに、仮想的に流体を流すことが出来るAutodesk simulation CFDで流体の条件を付与して流れの影響をみた。その結果について述べる。図4-6は、弊社で使用している加工液ノズルのCAD画像である。ノズルの構造は、2重構造となっている。図8左側の流入口から加工液を導入して、図5下部の赤四角で囲った部分のスリットから加工液が吐出される構造となっている。過去の開発で、この2重管の内管に特殊な加工をすると流体を均一に流すことが出来るようになっている。しかし、これらを定量的に評価することが出来ていなかったことから、シミュレーションを行うことで、実際の現象とシミュレーション結果との関係性を検証した。

① シミュレーション条件

まず、環境条件は、流体：水 体積流量：60L/min としてシミュレーションを実施した。シミュレーションを実施した加工液ノズルは、旧型のノズル、改良を加えた新型ノズル、新型ノズルをさらに変更したCADモデルのみのノズルを用意した。形状に関しては、ノウハウ的な要素が強く記載しない。

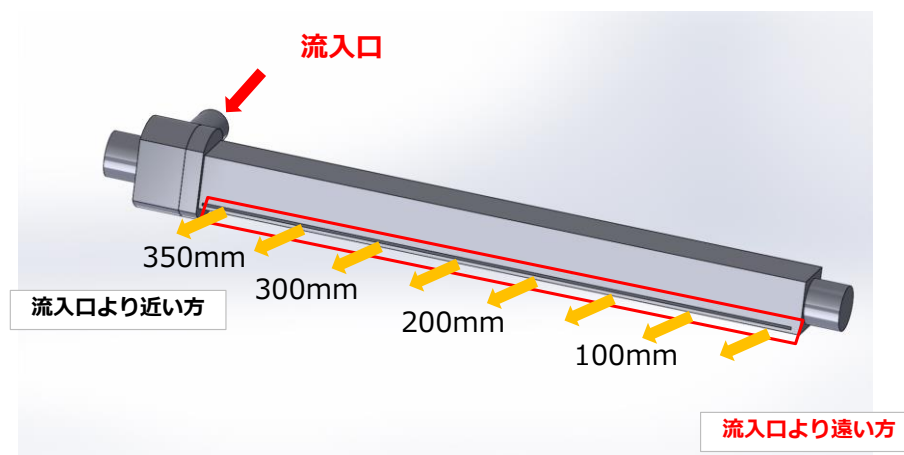


図 4-6. 加工液ノズルの CAD 画像

② シミュレーション結果

流入口より遠い方を基準(0mm)とし、流入口より近い方を(350mm)としてグラフを作成した。図4-7を確認すると、旧型のノズルでの0mm地点と350mm地点の流速の差よりも、改良を加えた新型ノズルでの流速差の方が小さくなっていることがわかる。シミュレーション用に作成したモデルでは、さらに流速の差が小さくなっている。このことから、内管に施した特殊加工の有用性が確認出来たと同時に、新たに作成したCADモデルでは、流速差がさらに小さくなる可能性を確認出来た。このことから、境界条件および加工液ノズルの設計条件を因子および水準という形で設定して、いくらのシミュレーションを実施することで影響の大きい因子および境界条件に左右されにくいノズルの検討が出来るのではないかと考えている。実際の現場においても流入口に近い方で液の吐出量が少ないことから整合性がとれていることがわかった。

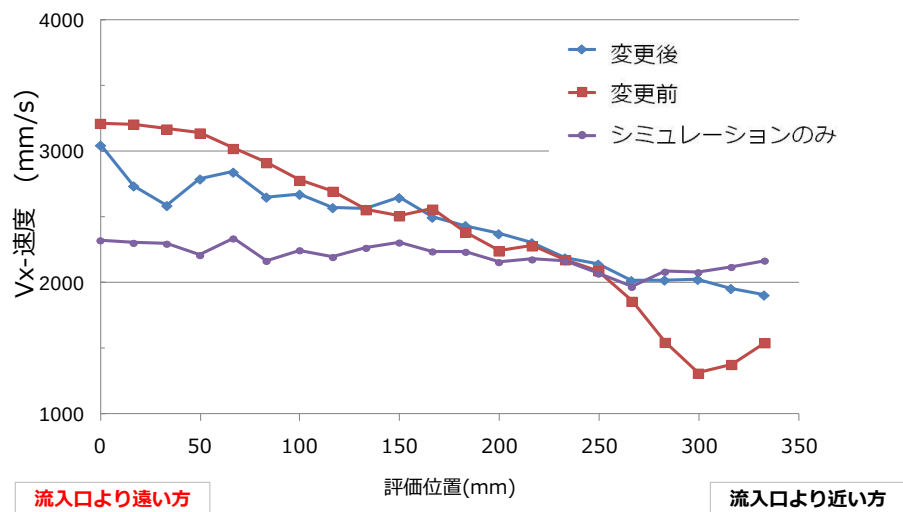


図 4-7. シミュレーションによるスリットからの流速結果

③ 加工液の粘度がノズルに与える影響の検討

加工液の粘度によりノズルからの流れが変化することがわかっている。樹脂コーティングワイヤーで使用している加工液に関しても、加工前と加工後で、粘度の変化が確認された。このことから、加工液粘度の違いがノズルから吐出される液の流速に変化を与える可能性をシミュレーションによって検討した。図 4-8 にその結果を示す。

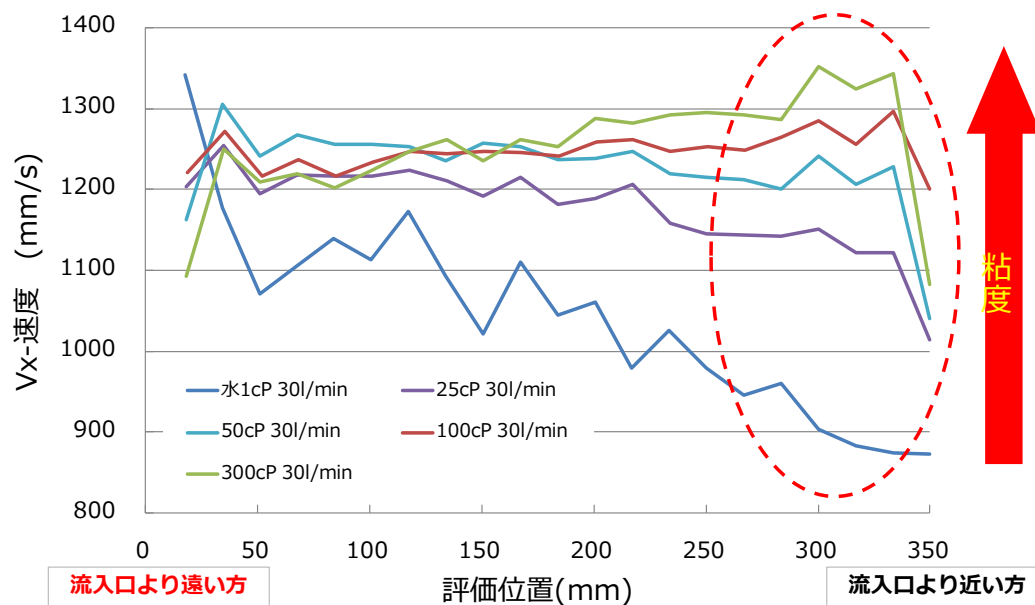


図 4-8. 加工液の粘度の流速結果

今回、シミュレーションに使用したのは改良を加えた新型ノズルである。境界条件は、流体：図 4-8 に記載 体積流量：30L/min で水を流した場合には、流入口に近い方の流速が遅いという結果を示した。しかし、粘度を上げると流入口に近い方の流速が変化し、粘度によっては流速が上がるという結果を得た。つまり、粘性の小さい加工液においてはノズルの噴出口の長さが流速の均一性に影響する。このことから、粘度がスリットから吐出される加工液の流速に影響することがわかった。今回示した加工液の流れが、切断精度に大きく影響するとの考えのもと検証を行った。しかし、従来機や実験機で切断実験を進めていくと加工液の流れ以上に影響を及ぼす因子が多いことが見えてきた。そのため、過去の実験結果との相関を取るために加工液ノズルの形状は変更せずに実験を進めた。ただし、今回得られた知見は今後の装置開発で有益な情報となりえる。

【5】 試作機の評価と新技術の効果の確認
(株式会社タカトリ)

【5－1】 試作機の剛性、スラリー流路、温度の計測

(1) 砥粒の効率的な循環に向けて

樹脂コーティングワイヤーでは、加工油にダイヤモンド砥粒を懸濁させたスラリーと呼ぶ加工液を利用してインゴットを切断する。そのため、加工油に懸濁しているダイヤモンド砥粒の濃度を安定化させることが重要である。つまり、装置内に砥粒が滞留することは砥粒濃度の不安定化を引き起こす因子となる。このことから、試作機を用いて装置内での砥粒のたまりやすさを検討した。評価の方法としては、ひとつは加工液の装置内に吐出した状態で装置を運転し、一定時間動かした後に目視により砥粒のたまり具合を確認するという方法、もうひとつは、たまった砥粒を収集し重量を測定するという方法である。



図 5-1. 加工後の装置内の砥粒だまり箇所

結果として、装置内でも砥粒のたまりやすい部分、たまりにくい部分のある事がわかった。図 5-1 から切断中にどれだけ加工液が掛るか、また各部品の上を加工液がどれだけ早く流れるかということが砥粒のたまりに影響していることがわかった。まず、たまりにくい場所としては各ガイドプーリーの軸が挙げられる。ガイドプーリーの軸は円筒形状であることから、砥粒がたまるような、地面に対して水平な部分が設けられておらず砥粒のた

まりは少なかった。一方、テンションアームは同じような高さに設置されているにも関わらず砥粒のたまりが多かった。これは、先ほど述べたことの逆であり、水平な部分が存在するため砥粒がたまりやすいのだと考えられる。その他にたまりやすい部分としてはリール用のカバーが挙げられる。こちらも地面に対して水平な部分には砥粒がたまりやすいという結果となった。しかし、カバーの場合、45° 程度の角度が形成されている部分に関しては砥粒のたまりが少ないことから、水平な部分を形成しない構造にすれば砥粒のたまりを低減出来ると考えている。また、もっとも砥粒のたまりやすい部分は加工液タンクにもどるドレンパンと呼ばれる部分である。こちらの部分は複数の鉄板を溶接によって接合しており、その溶接部分に砥粒がたまっている。このことから、排出口の部分を出来る限り凹凸のない構造にすることで、砥粒たまりを低減出来ると考えている。

また、装置内にたまった砥粒を収集して重量を測定した。結果は、図 5-2 のように総重量 720 g の砥粒のうち 76.5 g の砥粒が装置内から得られた。つまり、約 10% の砥粒が切削に寄与しない状態になっているということである。本研究ではより低濃度で切削することを目指しているため装置内の砥粒たまりの低減が必要であることがわかった。



図 5-2. 装置内にたまった砥粒の重量

(2) 加工液の均熱化に向けて

従来の装置は線速 700m/min までの仕様であったため、問題として浮上してこなかったが、図 5-3 に示すように線速 1000m/min になると装置から発生する熱、および加工時の発熱により加工液の温度が上昇することがみられた。加工液の温度が上昇することは、加工中に装置・インゴットなどさまざまな部分が膨張や収縮をするということである。切断精度が要求されるワイヤーソーにおいて、温度の変化は切断精度の悪化を意味する。このことから、加工液タンクでの加工液の冷却の重要性が明確になった。そこで我々は、タンクの冷却能力の問題点を抽出することにした。問題点として挙げたの

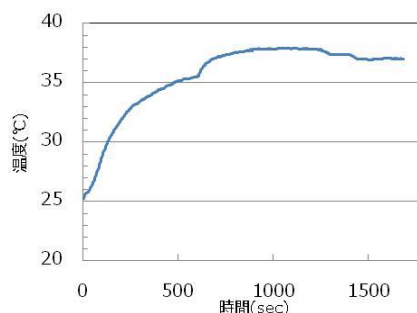


図 5-3. 線速 1000m/min 時の加工液温度と加工時間の関係

は、タンクの冷却機構・冷却液を供給するチラーの能力の2点である。

上記の問題点から、タンクの構造が原因なのか、供給される冷却液および冷却器が問題なのかを明確にすることにした。従来の加工液タンクは、大きく区分すると、上蓋と加工液を貯液する器の2つの部品から構成されている。その貯液する容器の中に冷却液を流し込んで加工液を外側から冷却するという方式がある。これを外周冷却と呼んでいる。一方でらせん状のパイプを貯液する容器の中に設置し、冷却液を流し込み加工液を冷却するという方式がある。これをスパイラル冷却と呼んでいる。大型の装置ではこれら二つの方式を併用して使っているが、試作機で使用するタンクに関しては小型であることから外周冷却のみとなっている。冷却効果を上げようとするすると熱交換部分周辺で乱流を起こすことが効果的な冷却につながると考えられる。それを踏まえて考えると外周冷却は、平滑な面を液が通過するため、表面積が大きくても熱交換がしにくい構造である。一方、らせん状のパイプを貯液する器内に設置すると容器内で乱流が発生しやすい状況となり熱交換が促進されることになる。つまり、身近なイメージでいえば同じ20℃の部屋で扇風機の風(乱流)を体にあてるかどうかで体感温度が変化することと同じ感覚である。

検証方法としては、加工液タンクに水を等量充填し、図5-4のように出力1KWの投げ込みヒーターを投入し、冷却効果を確認した。使用した加工液タンクは、図5-5のような外周冷却・スパイラル冷却ともに使用可能な30Lのタンク(試作機のタンクは14L)にて実験した。



図5-4. 各冷却の写真

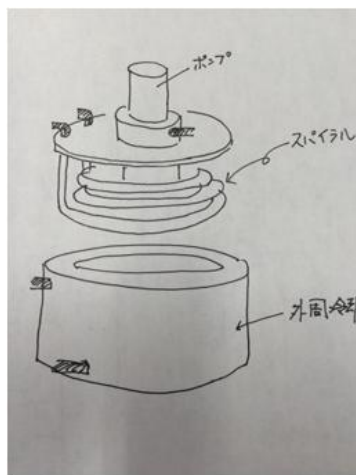


図5-5. 各冷却の写真

結果は、図 5-6 に示したようにスパイラルによる冷却の優位性を示す結果となった。

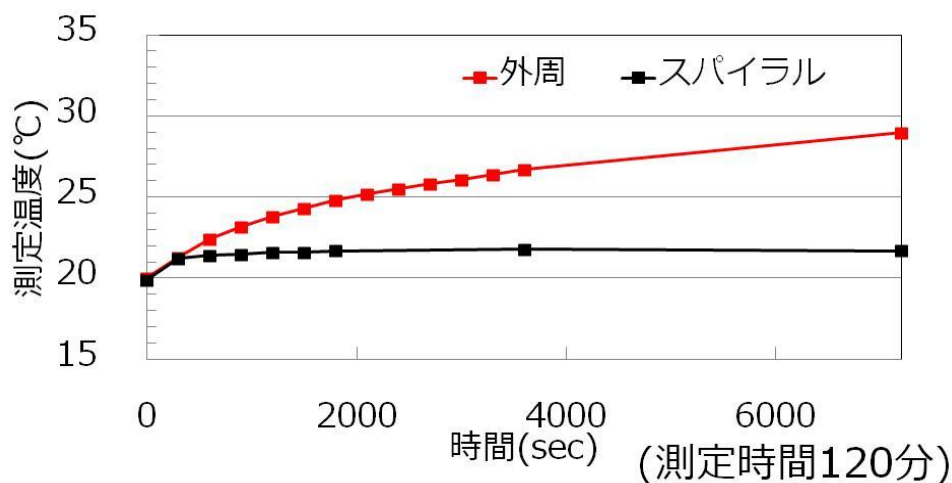


図 5-6. 測定温度と加工時間の関係

確かに、今回の実験ではスパイラルでの冷却に関しても設定温度よりも 2℃程度温度上昇しているが、10 分以内に温度が一定になっていることから外周冷却との熱交換能力の差は歴然である。

さらに、装置が稼働している最中に加工液を装置内に吐出した時の温度差についても検討した。図 5-7 で示すようにスパイラル冷却の方が冷却能力が高いことがわかる。しかし、今回の結果に関してはスパイラルも温度の上昇が設定値よりも約 10℃高いことからスパイラル冷却の改良だけでは加工液の均熱化が難しいという可能性を残した。

このことから、問題点として考えていたチラーの冷却能力不足だけではないことがわかった。やはり、タンクの熱交換機能に関しては設計段階から検討する必要性を認識した。そのため量産機では熱交換能率のよい冷却器の設計が必要になると思われる。また、それによってより少ない加工液による切断や省スペースといった部分でのメリットが出てくるものと思われる。

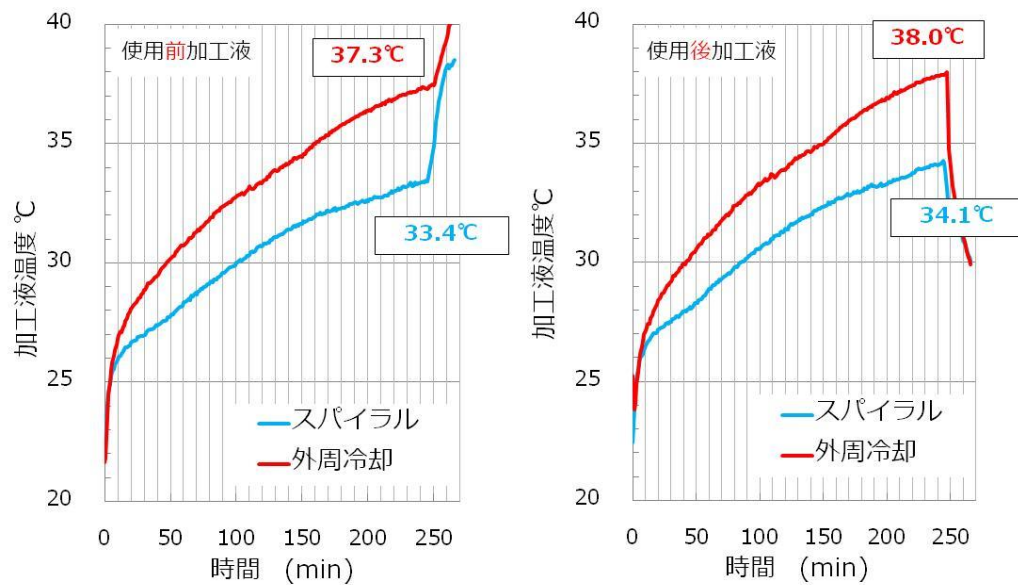


図 5-7. 測定温度と加工時間の関係(装置稼動時)

(3) ひずみゲージを用いた装置挙動の確認

マルチワイヤーソーの加工精度に影響を与える部品として、ワークローラーがある。そのワークローラーの挙動を把握し、装置設計にフィードバックすることは装置の品質向上につながると考えた。たとえば、剛性がなければ加工中に部品が変形するといった問題が発生し、それが加工精度に影響をおよぼすからである。しかし、切断中は加工液が飛散するといった問題があることなどからカメラのように視覚で変形や変位をとらえることは非常に困難である。そこで、我々は構造物の変化を電気抵抗の変化で検出可能なひずみゲージをもちいて評価することにした。ひずみゲージの概念図を図 5-8 に示す。これにより、加工中であっても装置内の挙動を評価することが可能であると考え。はじめに、ワークローラーおよびスピンドルヘッドと呼んでいる切断に着目して評価を実施した。方法としては、図 5-9 のように 3 軸構造となっているワークローラーの中でも駆動している下側のワークローラー間にひずみゲージを取付けて駆動時の挙動をひずみ量で確認することにした。

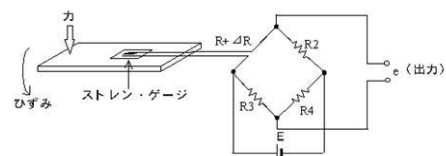


図 5-8. ひずみゲージ概念図



図 5-9. ひずみゲージおよび温度センサー取付部

確認方法としては、実際に切断しないということ以外には、切断時と同じ状況に装置内を設定した。センサーとして、ひずみゲージと同じ場所に温度計も併設した。なお、変化

を知る為に加工液のあるなしを因子として投入した。その結果を図 5-10 に示す。

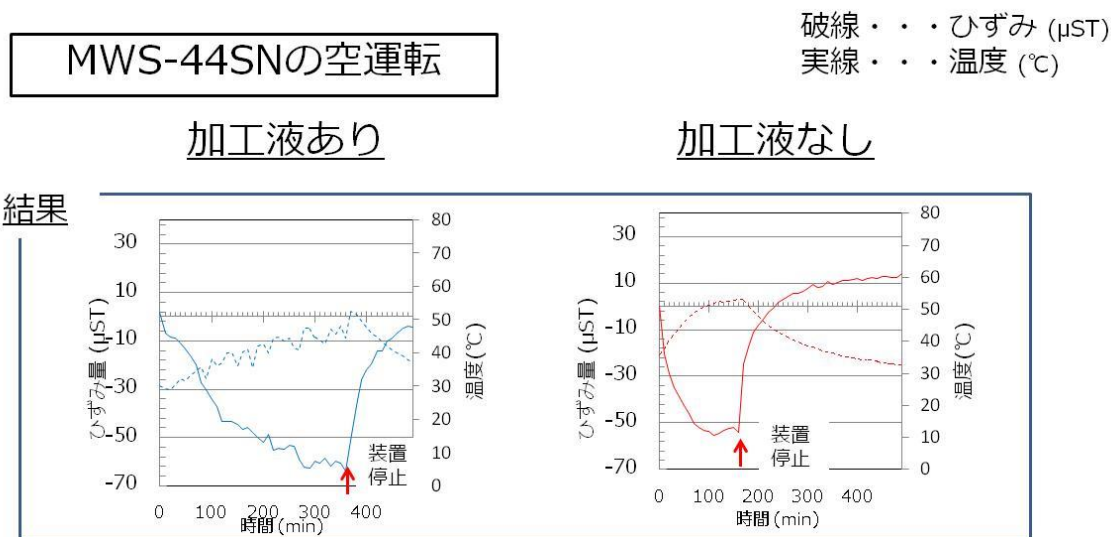


図 5-10. 加工液有無によるひずみゲージの評価

左が加工液あり、右が加工液なしの結果である。破線がひずみ、実線が温度を示している。このグラフからわかるように装置に温度上昇とともにひずみゲージの値が負の値を示していることがわかる。つまり、装置温度の上昇によってひずみゲージを設置した場所には圧縮方向の力が掛っていることがわかる。ただし、取りつけた部品は温度上昇によって膨張する部材であるため圧縮が掛っていることは考えにくい。

このことから、つぎに加工室の表側と裏側で温度差があるのではないかと考えた。つまり、図 5-11 のように表面と裏面で温度差が生じるとスルメのようなイメージでそりかえるのではないかと考えた。そこで、さらに図 5-12 のようにセンサーの数を増やして確認をおこなった。結果として加工室の表面と裏面で計測を実施した。

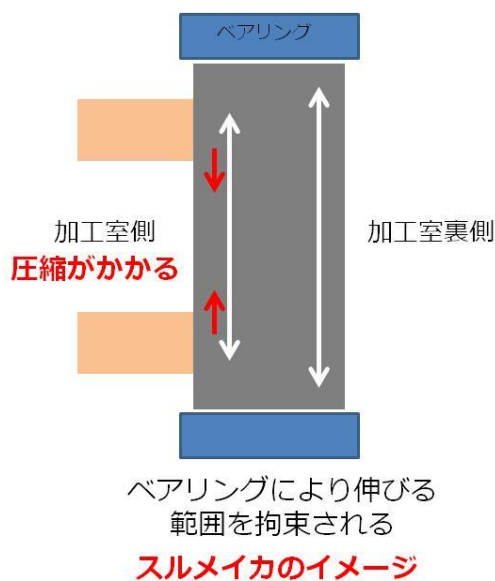


図 5-11. 加工中のスピンドルヘッドの表面と裏面

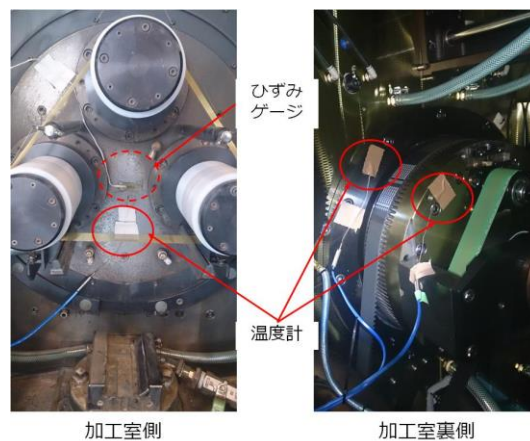


図 5-12. 加工中のスピンドルヘッドの表面と裏面

結果として加工室の表側と裏側で温度の変化が確認出来たことから仮説として挙げた部分に関しては可能性があると考えられる。

さらに、今回の測定でわかったこととしてワークローラーの中央部に設置したひずみゲージの伸び縮みの挙動がサイクル数と呼んでいるワイヤーの往復運動と関連している可能性が示唆された。

検証の方法として、図 5-13 に示したようにひずみゲージを取付けて線速だけを可変してその変化を確認したところ、図 5-14 のようにどの条件においてもサイクル数に起因するような波形を確認したのである。

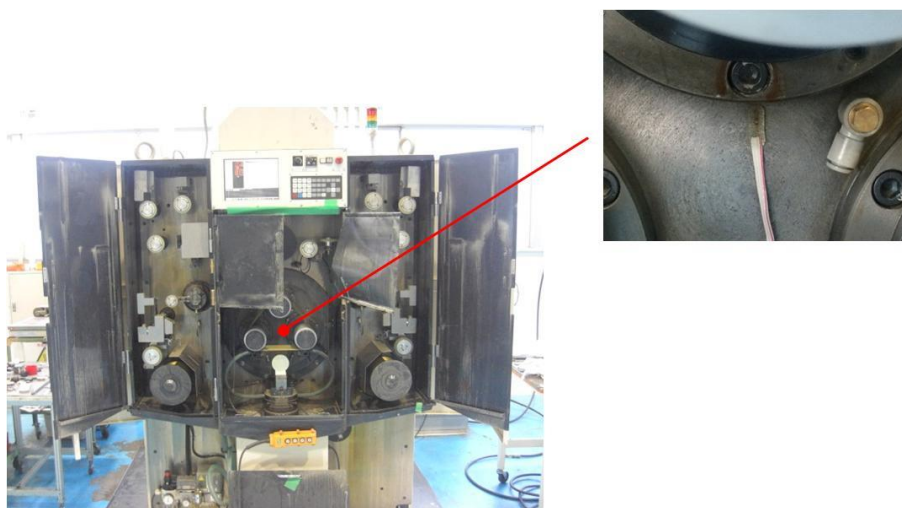


図 5-13. ひずみゲージの取付位置

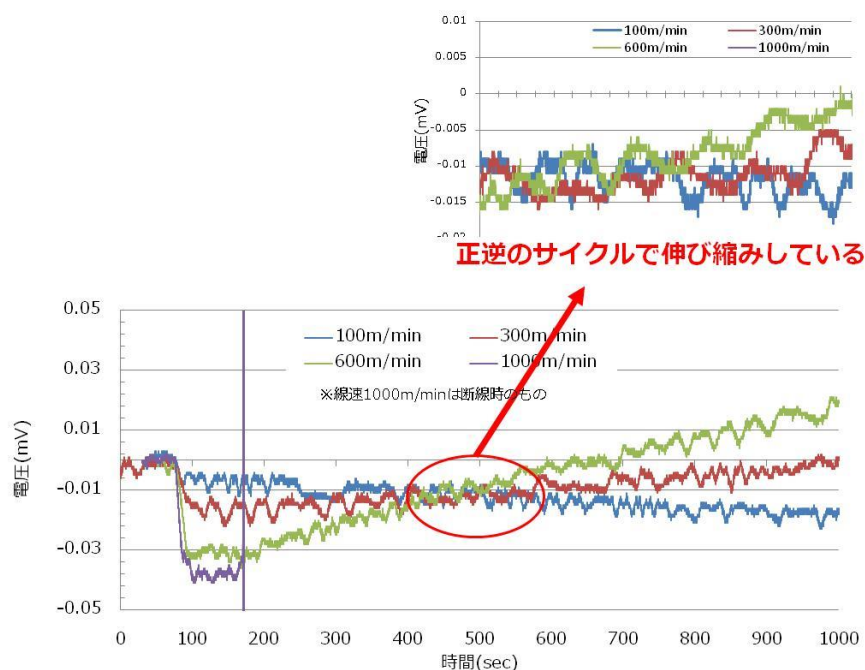


図 5-14. 線速を変えた時のひずみゲージの伸び縮み

拡大図を見るとグラフが波打っている様子というのを確認することが出来るのであるが、この波の周期とワイヤーの往復のサイクルがほぼ同じ周期であることが確認出来た。このことから、往復のサイクルがスピンドルヘッド部の変形に影響を与えていることがわかった。ワイヤーの正逆運動によってワイヤーの張力変化が起きていることも想定されるためそれらも原因としてあるのではないかと考えられる。今回、加工液が流れる経路に関しては砥粒の滞留。また、加工液の温度上昇に対する対策。さらに、温度上昇により発生する装置内のひずみを把握する技術に一定の目途がついたと考えている。今後はこれらの技術・知見をもとに量産機開発に向けた取り組みを進めていく。

【5-2】 試作機を用いた鏡面スライス加工技術の評価テスト

【1-1】-1の従来機と実験機のテストでは3インチのウエハの反りの精度(PV値)が150um程度となった。しかしながら切断開始5mmと切り終わり5mmの部分を除くと反りの精度(PV値)は40um程度となる。これをもとに、試作機では切り始めと切り終わり部の切断条件改善に取り組んだ。なお、(3)のテーブル速度可変によるテストに関しては実験機での結果である。

(1) 張力による精度比較

切り始めの反り (PV 値) が悪いのは、加工初期にワイヤーが外乱を受け安定した切断が出来ていないのではないかと考えた。外乱を排除する事が出来れば反り低減になると考えた。そこで、外乱つまり、ワイヤーを変形させる何らかの力に堪えるだけの力をワイヤーに持たせることにした。方法としては、表 5-1 に示した張力を 20N から 25N に変更ということである。その結果を図 5-15 に示す。

表 5-1. 加工条件(張力の比較)

装置		MWS-44SN	
加工物		2インチSiC	
ダミー材		シリコン	
ボンド		アクリル系ボンド	
スラリー	砥粒径[um]	5	
	流量[L/min]	8.4	
	ノズルからのスラリー濃度[wt%]	5	
ワイヤー	ワイヤー線径[mm]	φ0.13	
	樹脂厚[um]	5	
	ワイヤー供給量[m/min]	1.8	1.2
ワークローラーピッチ[mm]		1	
線速[m/min]		700	
加減速時間[s]		3	
一定速時間[s]		12	
張力[N]		20	25
揺動角度[deg]		0.5	
揺動速度[deg/min]		170	
切断速度[mm/min]		0.06	

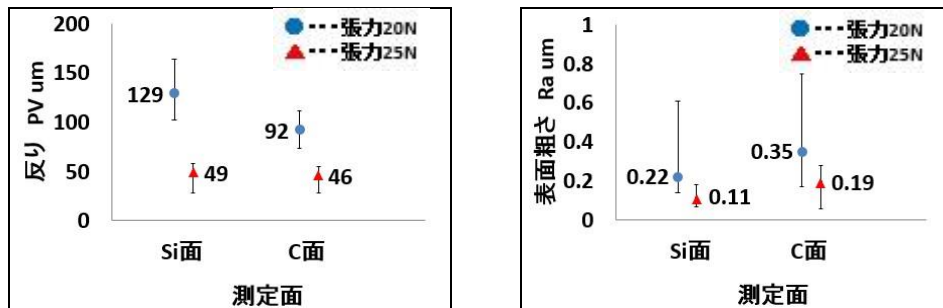


図 5-15. 反りと表面粗さの結果(張力の比較)

図 5-15 の結果を確認すると、張力を 25N にしたことによって、反り、表面粗さともに低い数値(良化)になった。

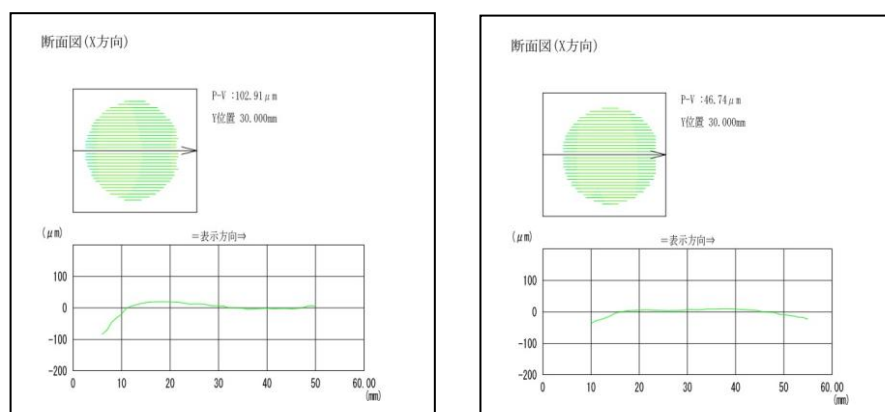


図 5-16. ウエハの反り断面図(張力の比較)

図 16 の結果から張力を高めたことにより、加工初期にワイヤーが受ける外乱を低減でき、反り、表面粗さとともに数値が良化するという知見が得られた。ただし、張力を 25N 以上に高める場合、現状の母線径 $\phi 0.12 \text{ mm}$ のワイヤーでは断線のリスクが非常に高くなるという懸念があり、このことから張力をこれ以上高める事は難しいと考えられる。さらに張力で精度を追求していく方法を用いる場合は母線径を上げて張力を上げる方法または高張力でも安定したワイヤー走行ができる装置を開発すること等が挙げられる。母線径を上げてのテストではカーフロス(切りしろ)が大きくなることなどが問題として考えられる。

(2) ワイヤーのたわみを一定にしてのテスト

円柱形のインゴットを丸形状の面に対して平行に切断する場合、切断の進捗によって切断長さが変化する。(図 5-17 参照)このことから、切り始めと切り終わりは、切断時間を短くするためにテーブル速度を上げる場合が多い。上記理由から、ワイヤーの外乱抑制のために同じ方法を用いた。この時点では適切な切断速度の設定が難しかったため、装置の機能としてついているたわみ制御を使い、プレテストを実施した。たわみ制御とは切削工具であるワイヤーの変位(たわみ)をセンサーによって検知し、たわみがある一定以上になるとテーブル速度が 0 とし、たわみがある一定以下になると動き出すように制御する機能である。たわみはある一定以上にしなければいけないのでテーブル速度は 50 mm/h と速い速度に設定し、今回はワイヤーが 7 mm たわむとテーブルが静止するように制御した。プレテストの加工条件を表 5-2 に示す。

表 5-2. 加工条件(プレテスト)

装置		MWS-44SN
加工物		2インチSiC
ダミー材		シリコン
ボンド		アクリル系ボンド
スラリー	砥粒径[um]	5
	流量[L/min]	8.4
	ノズルからのスラリー濃度[wt%]	5
ワイヤー	ワイヤー線径[mm]	φ0.13
	樹脂厚[um]	5
	ワイヤー供給量[m/min]	1.2
ワークローラーピッチ[mm]		1
線速[m/min]		700
加減速時間[s]		3
一定速時間[s]		12
張力[N]		20
揺動角度[deg]		0.5
揺動速度[deg/min]		170
切断速度[mm/min]		0.83

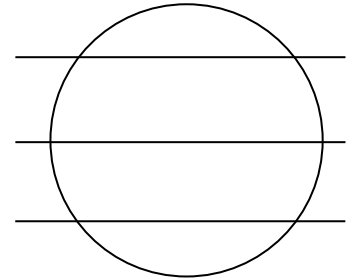


図 5-17. ワークの切断長さの変化

プレテストにより、たわみ量 7mm にする際のテーブル速度がわかった。たわみ 7mm 制御時のワーク切り込み量と切断速度の関係を図 5-18 に示す。

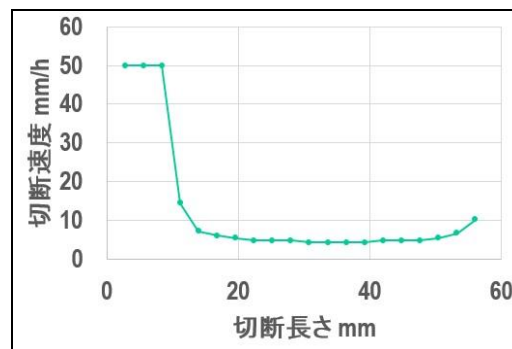


図 5-18. ワーク切り込み量と切断速度の関係(プレテスト)

図 5-18 よりたわみ量を 7mm 一定で切断するためのテーブル速度の条件がわかったので、図 5-18 のようにテーブルを可変させるように設定し、テストを実施した。テスト結果を図 5-19 に、ワークへの負荷と時間の関係を図 5-20 に、反りの詳細として切断したウエハ断面を図 5-21 に示す。

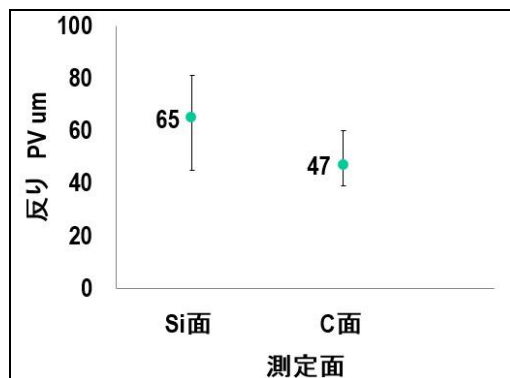


図 5-19. 反りの結果(ワイヤーのたわみ一定)

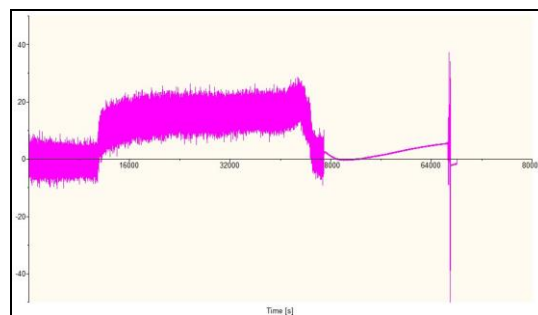


図 5-20. たわみと切断時間の関係(ワイヤーのたわみ一定)

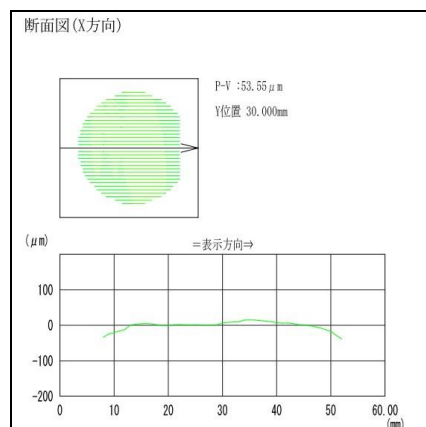


図 5-21. ウエハの反り断面図(ワイヤーのたわみ一定)

図 5-20 より負荷はほぼ一定で切断ができていることが確認できた。また図 5-21 の結果から反りの精度に関して切り初めと切り終わり部を除いては 20μm 以下で切断できていることから、ワイヤーのたわみを一定にして切断したことによる効果があったと考えられる。

(3) テーブル速度可変によるテスト

従来のワイヤーで丸いインゴットを切断する場合は切断面積に合わせて切り始めと切り終わりのテーブル速度を早めて切断する場合が多い。だが樹脂コーティングワイヤーを用いて切断する場合はその方法を用いると(2)の結果から切り始めと切り終わり部の反りの精度を改善することは難しいことがわかった。そこでこの実験では逆に切り始めと切り終わり部でテーブル速度を遅くして表 5-4 のような加工条件でテストを実施した。②と③のテーブル速度詳細を図 5-22 に示す。また反りの結果を図 5-23 に示す。

表 5-4. 加工条件(テーブル速度可変)

装置		MWS-21	
加工物		3インチSiC	
ダミー材		シリコン	
ボンド		アクリル系ボンド	
スラリー	砥粒径[um]	5	
	流量[L/min]	8.4	
	ノズルからのスラリー濃度[wt%]	5	
ワイヤー	ワイヤー線径[mm]	φ0.13	
	樹脂厚[um]	5	
	ワイヤー供給量[m/min]	2	
ワークローラーピッチ[mm]		1	
線速[m/min]		1300	
加減速時間[s]		3	
一定速時間[s]		12	
張力[N]		20	
揺動角度[deg]	SiC切り始め0～2mm	0.5	0
	SiC2mm～LAST		0.5
揺動速度[deg/min]		170	
切断速度[mm/min]	SiC切り始め0～2mm	0.07	0.03
	SiC2mm～15mm	0.07	0.05
	SiC15mm～65mm	0.07	
	SiC65mm～LAST	0.07	0.05

① ② ③

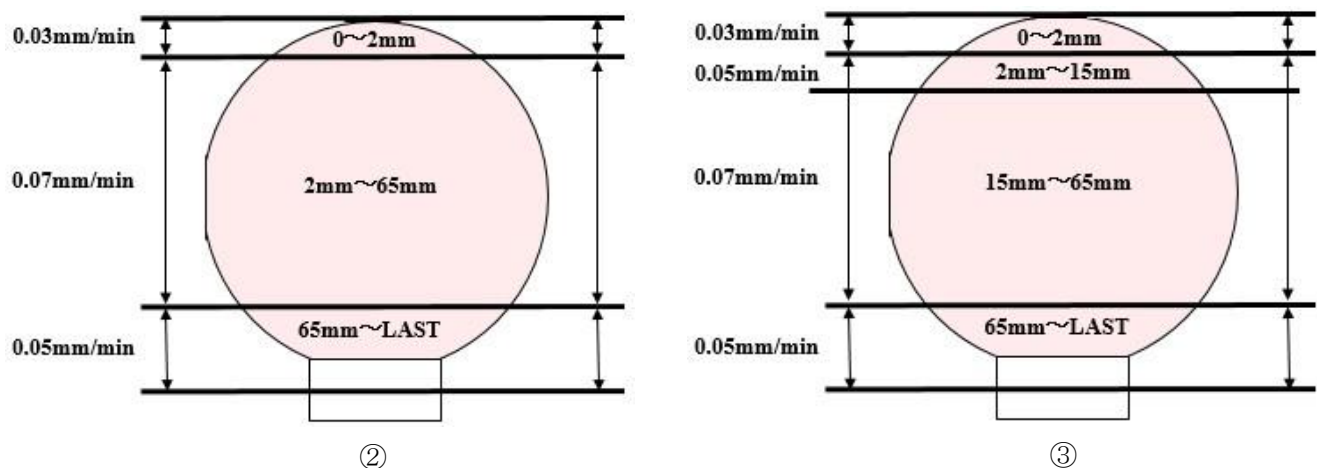


図 5-22. テーブル速度詳細

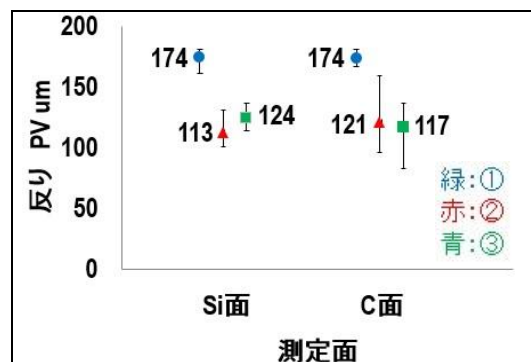


図 5-23. 反りの結果(テーブル速度可変)

表 5-4 の①の条件では比較の為にテーブル速度一定とした。②についてはSiC インゴットの切り始めから 0mm～2mm と 65mm～LAST までテーブル速度を遅く設定した。0mm の基準はワークとワイヤーの接触位置である。また切り始め 0mm～2mm に関しては揺動角度を 0° としている。③については②のテーブル速度の条件に加えて切り初めから 2mm～15mm でもテーブル速度を遅く設定した。

図 5-23 の反りの結果から①～③のテストでテーブル速度可変の効果が見られたのは②のテストで、切り初めから 0mm～2mm と 65mm～LAST のテーブル速度を遅くしたことによる効果が出たと考えられる。また反りの詳細として切断したウエハ断面を図 5-24 に示す。

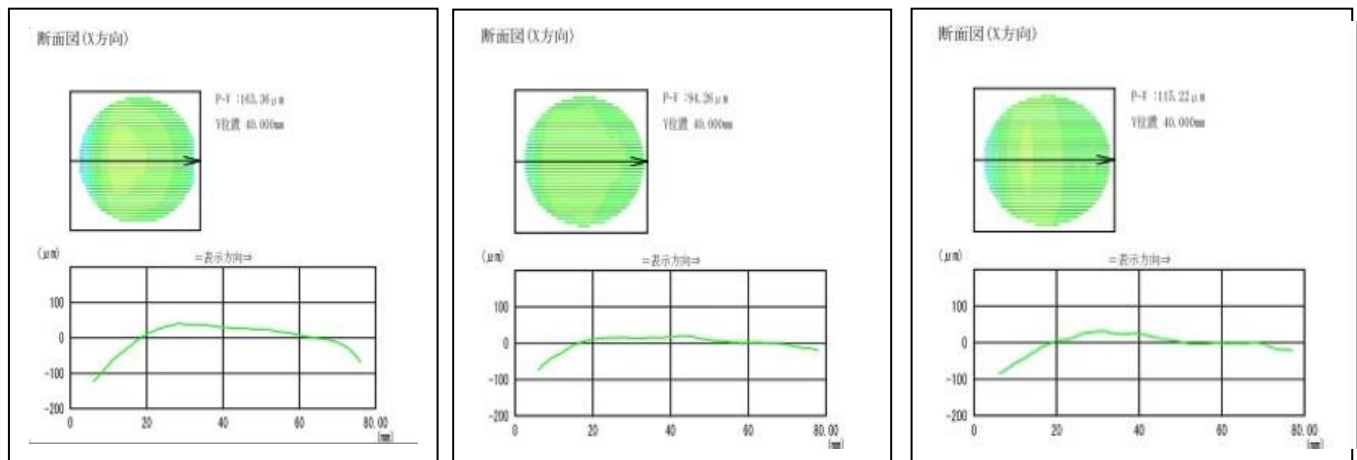


図 5-24. ウエハの反り断面図(テーブル速度可変)

図 5-24 の結果から切り始め 0mm～2mm と切り終わり 65mm～LAST のテーブル速度を遅くしたことにより、切り始めと切り終わり部の反りが低減していることが確認できた。

(4) ワーク上部にシリコン、上掛けノズルの有無による比較

ピアノ線による加工では切り始めの反りが悪くなる傾向がある。その改善策としてワーク上部にセラミックを乗せ加工する方法を用いることが多い。樹脂コーティングワイヤーを用いての切断に関しても、切り始めの反りが悪くなる傾向があり、同じ方法で改善をすれば良いのではないかと考えた。だがセラミックはダミー材として使用した際に樹脂コーティングワイヤーと相性が悪いことがわかっている。そこで樹脂コーティングワイヤーと相性の良いシリコンをワーク上部に乗せてテストを進めた。また今回のテストでは上掛けノズル使用の有無についても評価を行った。上掛けノズルについては砥粒の噛み込みを良くすることに狙いがあり、精度アップを目的としている。表 5-5 に加工条件を示す。

表 5-5. 加工条件(ワーク上部にシリコン、上掛けノズルの有無)

装置		MWS-44SN					
加工物		2インチSiC					
ダミー材		シリコン					
ボンド		アクリル系ボンド					
スラリー	砥粒径[um]	5					
	流量[L/min]	8.4	-	-	8.4	-	
	ノズルからのスラリー濃度[wt%]	5					
ワイヤー	ワイヤー線径[mm]	φ0.13					
	樹脂厚[um]	5					
	ワイヤー供給量[m/min]	1			1.2		
ワークローラーピッチ[mm]		1					
線速[m/min]		1,000			700		
加減速時間[s]		3					
一定速時間[s]		12					
張力[N]		20			25		
揺動角度[deg]		0.5					
揺動速度[deg/min]		170					
切断速度[mm/min]		0.06					
切り始めシリコン		無	有	有	無	無	有
上掛けノズル		無	無	有	有	無	有

① ② ③ ④ ⑤ ⑥

表 5-5 には合計 6 ショット分のテスト条件を表示している。テストの結果を図 5-25 に示す。また反りの詳細として切断したウエハ断面を図 5-26 に示す。

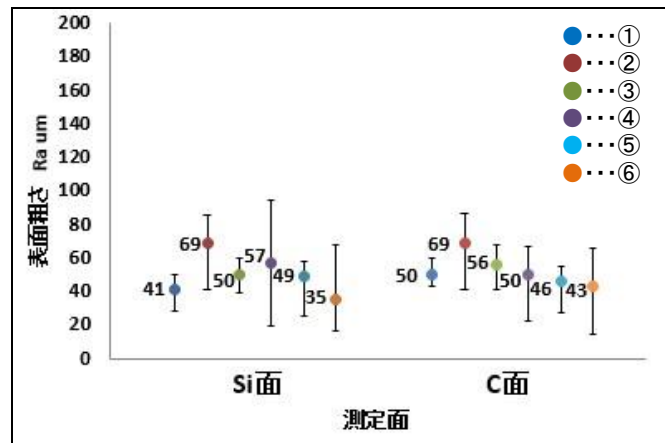


図 5-25 反りの結果(ワーク上部にシリコンと上掛けノズルの有無)

図 5-25 の結果から線速 1000m/min で実施した分に関してはシリコン、上掛け共に無しの方が反りは優れた値となっている。それに対して線速 700m/min の際には逆にシリコン、上掛け共に有りの時の方が反りは優れた値となっていた。線速を 700m/min に下げた理由としては線速 1000m/min 時に上掛けノズルから出るスラリーがワークに上手く掛かっていないことが実験中の加工室を覗いた際にわかった為である。上掛けノズルを使用した際の線速の効果に関しては再度見直しが必要であると考えられる。

【5-3】 量産機開発に必要な要求事項のまとめ

【5-1】で得られた結果より、量産機開発に求められる要求事項を以下に述べる。

- ① 加工後の装置内のスラリーの流れが遅い部分には砥粒だまりが確認できた。装置内に砥粒が溜まってしまうとタンク内の砥粒濃度が低下してしまい、ウエハの切断精度に影響を与えてしまうので砥粒だまりが発生しにくい装置設計にすることが求められる。
- ② 外周冷却とスパイラル冷却の冷却効率の評価結果から後者の優位性が確認できたのでスパイラル冷却機構を搭載したタンクを設計することが求められる。
- ③ ひずみゲージと温度センサを用いての装置剛性の評価結果から、装置の温度上昇を抑えることができれば加工中の装置のひずみを抑えられることが確認できたので、加工中に装置の温度変化が起こらないような装置設計にすることが求められる。

【6】 量産機の開発
(株式会社タカトリ)

目次には【6-1】、【6-2】のテーマを設定したが、各内容を切り分けて記載することが困難であったため、2つのテーマで1つの内容としている。

【6-1】 試作機を用いた評価結果のフィードバック設計

【6-2】 量産機的设计・製造

試作機(MWS-44SN)のテスト結果および剛性評価結果から量産機の開発を行った。量産機写真を図6-1に示す。



図6-1. 量産機(MWS-612DNX 遊離仕様)

(1) 高線速化・高剛性化

【1-1】-2の「従来機を用いたスライシング性能の評価」のテスト結果からワイヤー線速を上昇させると加工時のワイヤーのたわみ量が減少し、表面うねりの精度が向上することが確認できた。その実験の評価では1300m/minまで線速上げることに対する優位性は確認できているが、実験機の最高線速が1300m/minなことから、それ以上の線速での評価には至っていない。そこで量産機ではモーター容量をアップし、2000m/minまで出せるように開発を進めた。

また試作機のワークローラー部は片持ち支持だったが、両持ち支持とし、切断時に掛かる荷重に耐えられる剛性を有している。(図6-2参照)



図 6-2. 量産機の主軸部

(2) 主軸温度調節器仕様の導入

【5-1】の「試作機の剛性、スラリ一流路、温度の計測」の結果から高線速で運転をすると主軸部の温度が上昇し、ウエハの切断精度低下が考えられる。そこで量産機ではスピンドルヘッドの内部に冷却油を流し込み、スピンドルヘッドの温度を調節できる機能を導入した。

(3) タンクの冷却機構にはスパイラル冷却を導入

【5-1】の「試作機の剛性、スラリ一流路、温度の計測」の結果からタンクの冷却機構にはスパイラル冷却を導入した。またタンクの外周が室温により温められると考えられるので、スパイラル冷却と同時に外周冷却もできる機構としている。(図 6-3 参照)



図 6-3. 量産機のタンク

(4) 6 インチまでの切断

試作機は4インチまでのインゴットを切断できる装置だが、市場の動向によっては大口径の切断が必要になると考えられるので、6インチまでのインゴットを切断できる装置とした。

【6-3】 量産機を用いた鏡面スライス加工技術の評価テスト

【1-1】-2の「従来機を用いたスライシング性能の評価」のテスト結果からワイヤー線速を上昇させると加工時のワイヤーのたわみ量が減少し、表面うねりの精度が向上することが確認できた。だが実験機の最高線速が1300m/minであったことから、それ以上の線速を上げることに対する優位性は確認できていなかった。そこで量産機を用いて線速1500m/minと2000m/minでテストを実施した。加工条件については表6-1の加工条件で実施した。テストの結果は図6-4に示す。

表 6-1. 加工条件

装置		MWS-612DNX	
加工物		2インチハーフSiC	
ダミー材		シリコン	
ボンド		アクリル系ボンド	
スラリー	砥粒径[um]	2	
	流量[L/min]	-	
	ノズルからのスラリー濃度[wt%]	5	
ワイヤー	ワイヤー線径[mm]	φ0.13	
	樹脂厚[um]	5	
	ワイヤー供給量[m/min]	3	2.4
ワークローラーピッチ[mm]		1	
線速[m/min]		1,500	2,000
加減速時間[s]		5	
一定速時間[s]		10	
張力[N]		20	
揺動角度[deg]		0.5	
揺動速度[deg/min]		170	
切断速度[mm/min]		0.08	

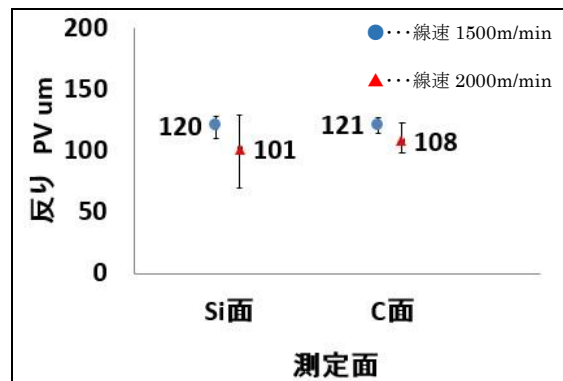


図 6-4 反りの結果

両者の結果を比較すると、反りは線速 2000m/min の方が優れていた。よって線速に関しては 2000m/min でも切断精度の向上の可能性があることが明らかとなった。

第3章 全体総括

3-1 研究開発の成果

実施項目【1】 樹脂コーティングワイヤーに対応した加工条件の最適化
(株式会社タカトリ/学校法人金沢工業大学)

【1-1】 従来機を用いたスライシング性能の評価
(株式会社タカトリ)

従来技術をベースとした自社製造の機械装置として実験機を製作し、加工条件の一つである揺動振動が、樹脂コーティングワイヤー加工に及ぼす影響について評価を行った。

スライシング加工における Peak-valley の値(以下 PV 値)の実験結果から、インゴットに入る部分と切断の終わりの部分でウエハの形状が大きく変化することがわかった。このインゴットへの入口と出口の加工条件をコントロールすることによって精度の向上が期待されることから、4 インチで設定している 20 分割の結果が効果を示すのではないかと期待している。また現時点で、13 時間半で問題なく切断出来ることが分かったこと、3 インチのウエハを Ave.52 μ m でスライシング加工出来る条件を知ることが出来た。

つぎに、実施したテストの各因子の分析により、主効果が顕著にみられたのは、砥粒濃度、供給量、サイクルであった。分析結果から、砥粒濃度が高いほど、供給量は少ないほど、サイクル数は高サイクルほど切断精度が向上することがわかった。同様に Ra については、供給量が少ないほど、切断速度に関しては低速ほど、サイクル数は多いほど良化することがわかった。

(学校法人金沢工業大学)

マルチワイヤーソーに揺動振動を付加し、切断速度を変えて SiC を切断した際の特性についてワイヤー走行方向並びに切断方向に対してそれぞれ検討した結果、算術平均粗さに関しては、ワイヤー走行方向、切断方向共に切断速度の影響は小さいことが分かった。また、表面うねりに関しては、ワイヤー走行方向と切断方向の双方で切断速度の上昇に伴って表面うねりが悪くなっていくことが分かった。

切断速度と加工能率の関係を分析した結果、切断速度 0.12mm/min の条件では 0.08mm/min のときに比べて、ワイヤーのたわみ量が増加したため、表面うねりが悪化したものと考えられる。しかしながら、本実験で用いた揺動型のマルチワイヤーソーでは、切断速度 0.12mm/min のときの表面うねりの平均値が最大で 20 μ m 以下となっているため、十分切断可能であることが確認できた。

本加工における切りくずの SEM 観察を行った結果、切りくず形状は細長く、せん断型の

切りくずが得られていることが分かった。また、ウエハ表面の観察を行った結果、シリコンを切断した場合と同様に加工表面が鏡面になっていることが分かった。以上より、本加工では延性モード加工が行われていたものと考えられる。

揺動運動を付加して SiC 材料のスライシング加工を行い、樹脂コーティングワイヤーの樹脂厚みがウエハ表面性状に及ぼす影響を検討した結果、ワイヤー走行方向と切断方向共に樹脂厚みの違いが算術平均粗さに及ぼす影響は小さいことが分かった。また、ワイヤーの樹脂厚みが $7\mu\text{m}$ の方が切断方向の表面うねりが向上していることが分かった。

樹脂厚みが異なるワイヤー工具の切断後の観察した結果、ワイヤーの樹脂厚みが厚くなることでワイヤー被膜部分の樹脂のクッション性が向上し、砥粒の保持性が高くなったため、表面うねりが向上したと考えられる。ウエハの観察からスクラッチ痕の数やその間隔は、樹脂コーティングワイヤーの樹脂厚みによって変化することが明らかとなった。しかし、本実験で使用した砥粒は $2\sim 3\mu\text{m}$ と非常に小さく、表面粗さは砥粒径に依存すると考えられるため、樹脂厚みの影響が小さかったものと考えられる。

本報告で用いた樹脂コーティングワイヤー方式とダイヤモンドワイヤー工具を用いた固定砥粒方式で切断した際のウエハ切断面の TEM 観察を行った結果、遊離砥粒方式では加工変質層が 276nm あることが分かった。また、固定砥粒方式では加工変質層が 700nm あることがわかった。さらに、固定砥粒方式で切断したウエハには潜傷が観察されたが、樹脂コーティングワイヤー方式においては、潜傷は全く観察されなかった。以上の結果より、樹脂コーティングワイヤー方式の方が加工面へ与えるダメージの点で、固定砥粒方式よりも優れていることが明らかとなった。

【1-2】 従来機を用いた被加工材料別の性能評価

(学校法人金沢工業大学)

実験機を用いて、樹脂コーティングワイヤーによる太陽電池用シリコンと SiC の比較試験を行い、被加工材料の特性の違いによって、求められる加工条件の変化の検証を行った。

揺動運動を付加してシリコンのスライシング加工を行い、揺動角度がウエハ表面性状に及ぼす影響を検討した結果、切断方向では無振動時の表面粗さが最も悪く、揺動運動を付加することで表面粗さが良くなっていることが分かった。また、揺動角度が 0.3deg から 0.5deg になることで表面粗さの向上が見られるが、 1deg になると無振動時と同程度まで表面粗さが悪化していることが分かった。次に、表面うねり(切断方向)の挙動を分析した結果、算術平均粗さと同様、切断方向では揺動角度 0.5deg が最も良く、この値から離れるにつれて表面うねりが悪化することが分かった。揺動速度一定条件下では揺動角度が小さくなると揺動振動数が大きくなり、揺動運動によって単位時間当たりにワイヤーが被削材を擦る回数が増加する。よって、揺動角度が 0.3deg の条件下では算術平均粗さおよび表面うねりが悪化したものと考えられる。一方、揺動角度が大きくなると、加工部に空気が流入し、表面性状が悪化するものと考えられる。よって、揺動角度 1deg の条件下では、算術平均粗さ

および表面うねりが悪化したものと考えられる。

揺動振動数を一定 ($f=1.42\text{Hz}$) として揺動角度を変化させた際の算術平均粗さ(切断方向)の挙動を観測した結果、揺動角度による影響は小さいことが分かった。揺動振動数を一定 ($f=1.42\text{Hz}$) として揺動角度を変化させた際の表面うねりの挙動を観測した結果、ワイヤー走行方向、切断方向共に揺動角度による影響は小さいことが分かった。揺動振動数一定条件下においては、単位時間当たりの揺動運動回数が一定となる。よって、各条件において加工部へのスラリーの流入・流出性は一定であったものと考えられる。また、揺動振動数が一定であることで、単位時間当たりにワイヤーが被削材を擦る回数も一定となる。したがって、揺動振動数一定条件下においては、算術平均粗さおよび表面うねりが揺動角度の影響を受けにくかったものと考えられる。

揺動運動を付加してシリコンのスライシング加工を行い、揺動振動数がウエハ表面性状に及ぼす影響を検討した。揺動角度を一定 ($\theta = 0.5\text{deg}$) として揺動振動数を変化させた際の算術平均粗さ(切断方向)は、切断方向では揺動振動数 0.708Hz と 1.42Hz が同程度であり、 2.83Hz では悪化していることが分かった。揺動角度を一定 ($\theta = 0.5\text{deg}$) として揺動振動数を変化させた際の表面うねりは、切断方向では揺動振動数 0.708Hz と 1.42Hz が同程度であり、 2.83Hz ではわずかに悪化していることが分かった。揺動振動数が大きくなると、単位時間当たりの揺動運動回数が増加し、ワイヤーが単位時間当たりに被削材を擦る回数が増加する。したがって、揺動振動数 2.83Hz では揺動運動によってワイヤーが被削材を擦る回数が増加し、表面うねりが悪化したものと考えられる。

【1-3】 試作機開発に必要な要求事項のまとめ

(株式会社タカトリ/学校法人金沢工業大学)

【1-1】【1-2】により、樹脂コーティングワイヤー加工における揺動技術および材料特性が、SiCスライシング加工に与える影響を明らかにした。これらの結果から、平成 26 年度に実施の試作機開発のフェーズにおいて、樹脂コーティングワイヤー対応機に求められる要求事項を抽出した。

高サイクルにおいてPV値が良好であったことから、高サイクルで安定性のある装置設計にすることが精度向上に寄与すると考えられる。

砥粒濃度に関して濃度が高いほどPV値がよかった。なお、スライシング加工によって装置内に砥粒だまりが見られた。このことから、砥粒濃度が高いほど精度がよかった要因の一つとして、スライシング加工時に濃度の変化がもっとも変化しにくかったのではないかということも想像している。このことから、装置内に砥粒だまりが発生しにくい装置設計にすることが精度向上に寄与すると考える。

従来から研究室で行っている太陽電池用シリコンの切断実験結果と本研究で行った実験結果を比較すると、樹脂コーティングワイヤーは加工液の冷却効果によって十分利用可能であった。通常のラッピング理論では、線速は早い方が高能率切断が期待できるため、

樹脂コーティングワイヤー対応機では 1500m/min 程度まで向上させる必要がある。

今回の円形 SiC 工作物の切断実験では、切断開始約 5mm 程度の範囲の加工面のうねりが極端に悪く、それ以降は向上していた。この結果より、工作物を切断するには加工初期のワイヤー蛇行が問題であり、この部分のうねり精度が加工面の全体の精度に強く影響を及ぼしている。そのため、加工初期の張力のみ高くして切断できるような張力変動機構を有する装置が必要であると判断される。

本研究で行った実験ではスラリーとして砥粒濃度 5wt%のダイヤモンドスラリーを利用している。ダイヤモンド砥粒のコストは通常のワイヤーソーで用いる砥粒に比して高コストで、撥水性が高いため、加工液中で沈降しやすい。そのため、本加工方法対応機では、装置下部の砥粒受けの部分で沈殿する砥粒を極限まで低減できる様な勾配を有する受け皿にする。ワイヤー張力調整部にワイヤーに付着して運ばれる微量スラリーに至るまできちんと回収できる勾配を有する受け皿が必要である。また、ダイヤモンドスラリーは既述のようにダイヤモンド砥粒が沈降しやすいため、スラリートankから加工液供給ノズルまでの配管並びに装置下部のスラリー回収受け皿からスラリートankまでの配管で砥粒が溜まらないように、管の内部と加工液の摩擦や管の曲げ部の形状を工夫する必要がある。

本加工法で利用しているワイヤーはその表面に樹脂がコーティングしてある。ワイヤーを往復走行させる時に、ワイヤーは巻き取りボビンに巻き付けたり、巻き取りボビンから送り出したりする。その際に、ワイヤー表面の樹脂をボビンのつば等の部分で傷をつけている。ボビンの形状やワイヤーとの摩擦性を向上させる必要がある。

実施項目【2】 樹脂コーティングワイヤーに対応した加工部材の最適化

(株式会社タカトリ/学校法人金沢工業大学)

【2-1】 スラリーの最適化(種類、粒径、形状、濃度等)

(株式会社タカトリ)

砥粒濃度に関しての評価をおこなった。結果として、濃度が濃い水準において精度の良化がみられた。ただし、本結果に関しては装置内での砥粒のたまりが影響している可能性を残している。そのため、追加の検証実験が必要である。

(学校法人金沢工業大学)

揺動型マルチワイヤーソーを用いた樹脂コーティングワイヤー方式による SiC の高能率・高精度を目的として、シリコンの切断加工における最適揺動条件及び Si 面と C 面の加工特性について検討した。そして、切断速度や加工ダメージ層、ワイヤー工具の樹脂厚みが加工特性に与える影響を砥粒径が 1~3 μm の砥粒を用いて比較を行った。また、ワイヤー線速や異なる砥粒径が加工特性に与える影響に関して検討を行った結果、以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 切断速度を上昇させると、設定した切断速度と実際の切断速度の差が大きくなり、ワイヤー工具のたわみ量が増加するため、表面うねりの悪化が避けられないことが明らかとなった。
- (2) 同じ切断速度の時に砥粒径が小さい砥粒を用いた方が表面性状は向上するため、砥粒径を小さくすることで更なる高精度加工に対して期待できる。
- (3) 切断速度を上昇させたときは砥粒径が大きい砥粒を用いた方が表面性状の悪化を防ぐことができるため、砥粒径が大きい砥粒による高能率・高精度加工に対して期待できる。
- (4) 固定砥粒方式よりも樹脂コーティングワイヤー方式で加工を行う方が加工変質層を低減できることが明らかとなった。
- (5) 樹脂コーティングワイヤー方式において砥粒径が小さいほうが加工変質層を低減できることが明らかとなった。
- (6) 樹脂コーティングワイヤー方式は加工時の切り屑が流れ型であるため、延性モード加工となることが明らかとなった。
- (7) 砥粒径ごとに樹脂厚みの厚さが切断精度に与える影響が異なるため、砥粒の大きさに対する樹脂厚みの最適値が存在することが明らかとなった。
- (8) ワイヤー線速を上昇させると単位時間当たりのワイヤー工具の走行量が増えるため、切断性が良くなり、加工時のワイヤー工具のたわみ量を低減でき、表面性状が向上するため高能率・高精度加工への期待ができる。
- (9) 粒径が 1 μ m の砥粒で加工した時、加工面のスクラッチ痕を低減できるため、ウエハ表面への文字の反射度合いやウエハの後ろにある文字の透過度合いは高くなることが明らかとなった。

【2-2】 被加工物の基材および接着剤の最適化

(株式会社タカトリ)

基材に関しては、評価の結果からシリコンまたはガラスが良好なダミー材であるという結論にいたっている。しかし、ダミー材は消耗品のため出来る限り安価であることが望まれる。このように市場で受け入れられるかという点も考慮しながら選定を進めていく。接着剤に関しては、新たに使用したアクリル系接着剤の有効性を確認することが出来た。ただし、接着剤の厚みが切断結果に影響することもあるため、接着剤の塗布技術に関しても今後知見を集めていく必要があると考えている。

(学校法人金沢工業大学)

接着剤の切断特性に影響を与える因子として、接着剤自体に自己潤滑性を有する

カーボンを入れた接着剤を作製し、今年度当初は実験を行った。その結果、接着剤中のカーボン含有量を増加させることで、切断性が良くなり、ウエハ下部の表面粗さや、影響部長さが小さくなるが、下部のチッピングが大きくなることがわかった。そのため、接着剤自体の特性の 1 つであるガラス転移温度と工作物を固着する際の膜厚に注目して今年度は実験を行った。その結果以下に述べることが明らかとなった。

- (1) 接着剤のガラス転移温度を高くすることで、加工中に発生する摩擦熱や加工熱の影響により、切断性が良くなる。また、ウエハ下部の表面粗さと影響部長さが減少する。
- (2) 接着剤の膜厚を薄くすることで、接着剤の切断時間が短縮され、切断性が良くなり、ウエハ下部の表面粗さと影響部長さが小さくなる。

【2-3】 部材類の最適化のまとめと最適な組み合わせの抽出

本研究では、揺動振動を援用した樹脂コーティングワイヤ方式を用いて SiC のスライシング加工を行い、揺動角度、加減速率、加減速時間、一定速時間、砥粒のアスペクト比、工作物の形状が加工特性に与える影響を評価した。以下に本研究で得られた結言を示す。

- (1) 砥粒のアスペクト比を小さくして加工を行うと、針状の砥粒が少なくなりウエハ表面のスクラッチ痕が減少することが明らかとなった。
- (2) 揺動角度を大きくして加工を行うと、スクラッチ痕の少ない面を得ることができるが、ウエハ表面性状が悪化することが明らかとなった。
- (3) 加減速率を大きくして加工を行うと、ワイヤーのたわみ量が減少し加工能率とウエハ表面性状が向上することが明らかとなった。
- (4) 加減速時間 3.0s で加工を行うと、スクラッチ痕は深くなるが、スクラッチ痕が多い部分と少ない部分が交互になっているため、算術平均粗さは向上することが明らかとなった。
- (5) 一定速時間を長くして加工を行うと、表面性状が悪化することが明らかとなった。
- (6) 2 インチ SiC の切断加工を行ったウエハの切断方向のうねりは 30 μ m を下回ることがわかった。

実施項目 【3】 樹脂コーティングワイヤーの断線メカニズムの解析
(奈良県産業振興総合センター)

【3-1】 各種条件下での破断強度評価

装置内で空運転したワイヤーに関しては破断荷重の低下は確認できなかった。そのためワイヤーが走行するだけでは、断線に影響はないと考えられる。

【3-2】 ワイヤー破断面解析

これまでの強度試験において、引張、ねじり、疲労など各種条件下での破断したワイヤーの破断面を観察した。これらのサンプルを分析することにより、実機で断線したワイヤーの破断面観察結果と照合し、断線の原因を推定することが可能となると考える。

【3-3】 限界使用条件の検討

樹脂コーティングワイヤーにおいて、疲労試験後の引張試験での破断荷重の低下は確認できなかった。しかし、疲労試験時の張力振幅が大きくなると、断線に至るケースが確認された。そのため、断線を予防するためには張力の変動を抑えるような装置設計が必要である。

【3-4】 ワイヤー断線についての実機評価・検証

プーリーが樹脂コーティングワイヤーで摩耗していないことを明らかにした。一方で、プーリーが加工液によって膨張している事も明らかになったため、膨張がワイヤー断線やウエハの切断精度に与える影響や、プーリーの材質または加工液の成分についての検討が必要であると考えられる。

また、ワークローラーの変位測定についての手法を確立した。また、ワークローラーにて特定の線速時に特異な振れが発生しているのを明らかにした。

実施項目【4】 試作機の開発

(株式会社タカトリ)

加工液の粘度によりノズルからの流れが変化することがわかっているが、樹脂コーティングワイヤーで使用している加工液に関しても、加工前と加工後で、粘度の変化が確認された。このことから、加工液粘度の違いがノズルから吐出される液の流速に変化を与える可能性をシミュレーションによって検討した結果、水を流した場合には、流入口に近い方の流速が遅いという結果を示していたが、粘度を上げると流入口に近い方の流速が変化し、粘度によっては流速が上がるという結果を得た。このことから、粘度がスリットから吐出される加工液の流速に影響することがわかった。現段階では、簡易レベルの評価でとどまっているため引き続き詳細な検証を進めていく。

試作機開発にあたっては、線速の向上が鏡面スライス加工に適しているという実

験結果をもとに装置開発を進めた。大きな部分としては、ワークローラー部、トラバーサ部、プーリー部の設計変更をおこなった。ワークローラー部では、高線速化による問題となる振動の抑制に注力した。トラバーサ部に関しては、ワイヤーが外れるといったことが検証中に発生した。これに関しては、断線が起こらない機構を設計し断線の頻度を低減させることが出来た。プーリー部に関しては、高速回転によるプーリー内のベアリングの短寿命に対応するための設計をおこなった。

実施項目【5】 試作機の評価と新技術の効果の確認 (株式会社タカトリ)

【5-1】 試作機の剛性、スラリ一流路、温度の計測

試作機の評価として、装置内での砥粒のたまり、加工液の均熱化、ひずみゲージによる装置内の挙動の確認およびインプロセス中のひずみゲージの有用性について作業を進めてきた。その結果、砥粒に関しては、装置内でのたまりやすさを実感的ではあるが評価することが出来た。加工液の均熱化に関しては、外周冷却よりのスパイラルなどタンク内に冷却機構を設けることで冷却効率を上げられることがわかった。今後は、冷却機構の設計等に注力し、高効率な冷却機構の開発を進めたいと考えている。ひずみゲージに関しては、従来であれば加工液により挙動を把握することが困難であった部分を定量的に評価することが出来るようになった。さらに、温度計との併用でそれが何に(たとえば温度)起因するものなのかを把握する技術を構築することが出来た。

【5-2】 試作機を用いた鏡面スライス加工技術の評価テスト

試作機のテストを進めるにあたっては切り始めと切り終わり部の反りの改善を目的としたテストを実施した。各テストの成果について以下に述べる。

(1) 張力による精度比較

ワイヤーの張力を高めたことによって切り始めの反りの精度を低減することができた。

(2) ワイヤーのたわみを一定にしてのテスト

樹脂コーティングワイヤーでもワイヤーのたわみを一定にしてあげれば、反りの精度が向上する可能性があることがわかった。(切り始めと切り終わり部は除く)

(3) テーブル速度可変によるテスト

ワーク上部にシリコン・上掛けノズルの効果に関しては線速 700m/min 時では効果が見られ、反りの精度が良好であった。

(4) ワーク上部にシリコン、上掛けノズルを用いてのテスト

切り始めと切り終わり部ではテーブル速度を低くしてあげたほうが反りの精度が良いことがわかった。

【5-3】 量産機開発に必要な要求事項のまとめ

【5-1】により、量産機開発に求められる要求事項を明らかにした。要求事項のまとめを以下に示す。

- (1) 砥粒だまりが発生するとウエハの切断精度に影響を与えてしまうので装置設計にすることが求められる。
- (2) スパイラル冷却機構を搭載したタンクを設計することが求められる。
- (3) 加工中に装置の温度変化が起こらないような装置設計にすることが求められる。

実施項目【6】 量産機の開発

(株式会社タカトリ)

【6-1】 試作機を用いた評価結果のフィードバック設計

【6-2】 量産機的设计・製造

【1-1】、【5-1】で得た知見を元に、量産機(MWS-612DNX 遊離仕様)の開発を行った。新しく取り入れた機能について以下に述べる。

(1) 高線速化・高剛性化

試作機のワークローラー部は片持ち支持だったが、両持ち支持とし、切断時に掛かる荷重に耐えられる剛性を有している。

(2) 主軸温度調節器仕様の導入

試作機での線速 1000m/min 運転時に装置の温度上昇が見られたので、量産機ではスピンドルヘッドの内部に冷却油を流し込み、スピンドルヘッドの温度を調節できる機能を導入した。

(3) タンクの冷却機構にはスパイラル冷却を導入

タンクの外周が室温により温められると考えられるので、スパイラル冷却と同時に外周冷却もできる機構としている。

(4) 6 インチまでの切断

市場の動向によっては大口径の切断が必要になると考えられるので、6 インチまでのインゴットを切断できる装置とした。

【6-3】 量産機を用いた鏡面スライス加工技術の評価テスト

量産機を用いて線速 1500m/min と 2000m/min でテストを実施した。線速 1500m/min

と 2000m/min で比較したところ、後者の切断精度の方が優れていたことから線速 2000m/min においても切断精度向上の可能性があったことがわかった。

3-2 今後の課題

今回の研究で反りに関しては 2 インチ SiC を 20 μ m 以下で切断することができた。その後の展開としてはさらに樹脂コーティングワイヤーの優位性を引き出すために高線速の装置を用いて高速切断、またウエハ取れ枚数を少しでも増やすために薄厚化および細線化といったところを評価する必要があると考えられる。またダミー材として扱っているシリコンに関しては切断精度に影響がなく問題ないが、高価な材料になるので安価なダミー材を探すことが必要であると考えている。

断線メカニズムの解明のためには、実機で切断加工に使用された各種ワイヤーの寿命変化及びその要因についてさらに評価・検証を行う必要がある。

3-3 事業化の展開

本研究開発成果は、株式会社タカトリが、本研究開発成果を導入したマルチワイヤーソーを販売することによって事業化を行う。株式会社タカトリは、S i Cのスライス加工機の世界シェアを寡占していることから、これらを材料とする電子部品のパワー半導体やL E Dの市場動向が、装置の販売数量に大きく影響する。

パワー半導体やL E D市場は大規模市場であるが、装置市場は小さなマーケットである。マルチワイヤーソーは、1回で最大250枚のウェハを生産するため、4インチの場合、1,000万個のL E Dを作ることになる。つまり、後工程に比較して生産能力が大きすぎるのが、マルチワイヤーソー市場が小さなマーケットである理由である。パワー半導体は、大きな基板を使うのでL E D程ではないが、小さなマーケットであることに変わりはない。このことが参入障壁となり、中小企業である株式会社タカトリが世界シェアを寡占できた背景であるが、ビジネスとしての採算が取りづらいといった面もある。S i Cは価格が安くなってきたとはいえまだまだ高価であり、まして、G a Nのインゴットは、価格が高いという以前に、通常簡単に入手できるものではないが、グローバルニッチトップ企業の地位を堅持するため、今後とも継続的に、この分野への投資を続けていく。

また、新興国のコピー製品などへの対応として、新しい研究開発に取り組み、A S P Dを深化させ、技術的先進性を確保し、そこで産み出される成果を有望な海外市場を含めて特許化したいと考えている。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。