

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

**「高品質シリコンウエハの安定供給のための加工技術と
検査技術の開発」**

研究開発成果等報告書

平成23年 9月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人やまなし産業支援機構

目次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究開発の背景	1
1-1-2 研究目的及び目標	1
1-2 研究体制（研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者）	3
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 シリコンウエハ研磨用炭砥石の開発	9
2-1 木炭の粉碎による粒径の変化	9
2-2 粉碎に伴う粒子形状の変化	11
第3章 炭砥石を用いた加工実験	13
3-1 炭砥石の作製	13
3-2 加工条件と表面粗さとの関係	15
3-3 研磨加工実験	16
第4章 炭砥石が及ぼすウエハへのダメージ	19
4-1 ウエハ表面の損傷	19
4-2 加工条件による表面粗さ	25
4-3 3点曲げ試験による抗折強度	26
第5章 自動ウエハ診断装置の開発	28
5-1 開発装置	28
5-1-1 検査原理	28
5-1-2 装置の構成	28
5-2 ウエハ表面の傷の検出	30
5-3 ウエハ厚さ及び表面粗さ測定	32
5-3-1 ウエハ厚さの推定	32
5-3-2 ウエハ表面粗さの推定	36
第6章 全体総括	41
6-1 総合研究開発成果	41
6-2 研究開発後の課題・事業化展開	41

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

シリコンウエハの薄型化は大容量半導体の開発を優位にし、世界をリードする先端加工技術となる。しかしながら、その加工技術には困難を伴う。すなわち硬脆材料である単結晶のシリコンは加工中に深い傷が入り易く、これまで如何にダメージを抑えるかが最大の課題であった。この加工は現状ダイヤモンド砥石を用い、砥石粒度を細かくすることで薄型化に対応している。そしてさらに最終加工をエッチングによる化学研磨に依存している。この加工法には2つの問題がある。1つは硬質のダイヤモンド砥石による強制切り込み加工によりシリコンはダメージを受け、厚さ方向に加工変質層と割れ、そして表面にはスクラッチが発生してしまうことである。さらに劇物毒物を使用しているエッチングは人命に関わる危険な作業である。そのため劇物に対する無害化設備や薬液処理などで莫大な費用がかかっている。このような問題を抱えたまま、日々生産している。現在、要求されているウエハ厚さがそれほど高くないので、現状の製造技術で何とか対応している。しかし今後更なるウエハの薄さが要求されることは必至で、現行の加工プロセスでは対応できない。このような背景下、新しい研磨工具の開発の必要性があった。すなわち複数のダイヤモンド砥石のうち、最終のダイヤモンド砥石(#2000)に置き換えられる研磨工具の開発である。しかも前述の理由でエッチング工程による鏡面加工の代替可能な工具である。この課題をクリアできれば、次世代の加工技術となり、世界をリードできる新技術となる。

また従来からの盲点としてウエハの検査があった。一般的に製造企業は加工技術に力点を置きすぎ、意外に検査チェック体制が甘いように思える。そのためウエハの検査ミスが起こることも事実である。やはり出荷時の検査体制を充実することは川下企業への高い信頼性を得る上でも実施しなければならない。そのためには少なくともサブミクロンレベル(目視では不可能)での欠陥チェックを行う必要がある。

このようにウエハ薄型加工の新技術と検査技術の開発は高精度、高品質を保証する課題である。

1-1-2 研究目的及び目標

本研究開発の目的は、川下企業の課題及びニーズであるシリコンウエハの高精度加工に基づく品質保証に対して、ウエハの薄膜化に伴う低ダメージ加工の実現とウエハの良品安定供給のための検査装置の開発である。

加工技術について、シリコンウエハは現状ダイヤモンド砥石及びエッチングにより除去加工が行われている。これを『炭』砥石(研削の一部とエッチング工程を加工範囲)に置き換えることでウエハ加工時発生するダメージの極小化が可能となる。その結果、

チップ抗折強度を大幅に向上させることも目標である。

本研究開発の具体的数値目標は、ウエハ加工後の平均抗折強度現状 400Mpa を 1.5 倍の 600Mpa、ウエハ加工変質層深さ現状 10 ~ 50 μ m を 1/10 の 5 μ m 以下、ウエハ加工後面粗さ現状 5nmRa を半分の 2nmRa、砥石コスト現状 300,000 円/個を 1/3 の 100,000 円/個とする。

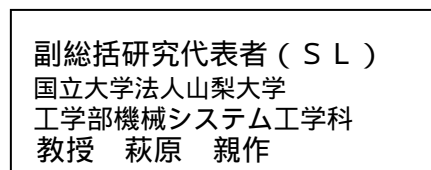
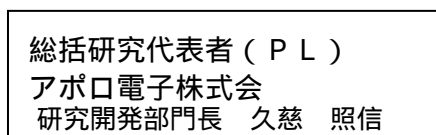
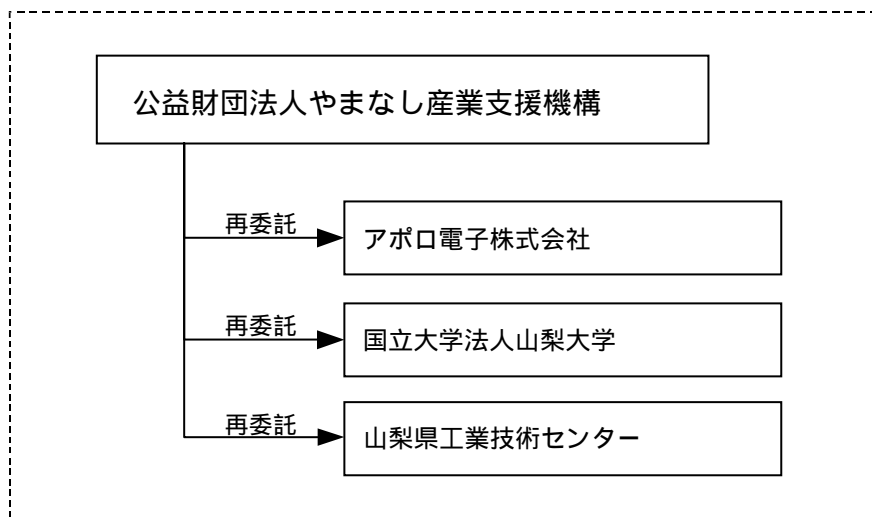
一方検査技術については、人間の目視による識別限界はミクロンレベルである。また、視覚に頼るために個人差や疲労などの様々な条件により検査結果のバラツキが生じやすい。そこでウエハ表面上の傷、汚れ、表面粗さを光乱反射法による判定可能な診断装置を開発する（非接触式）ことが目標であり、人間の目視以上の精度を目標値とし設定する。

識別限界現状ミクロンレベル（人間の目視）をサブミクロン（検出機）、ウエハ 1 枚当りの検出時間（傷のみ）現状約 1min を半分の 30sec 以内、検出機価格現状の数千万円 ~ 1 億円/台を 1/3 以下の 3 百万円/台とする。

1 - 2 研究体制（研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者）

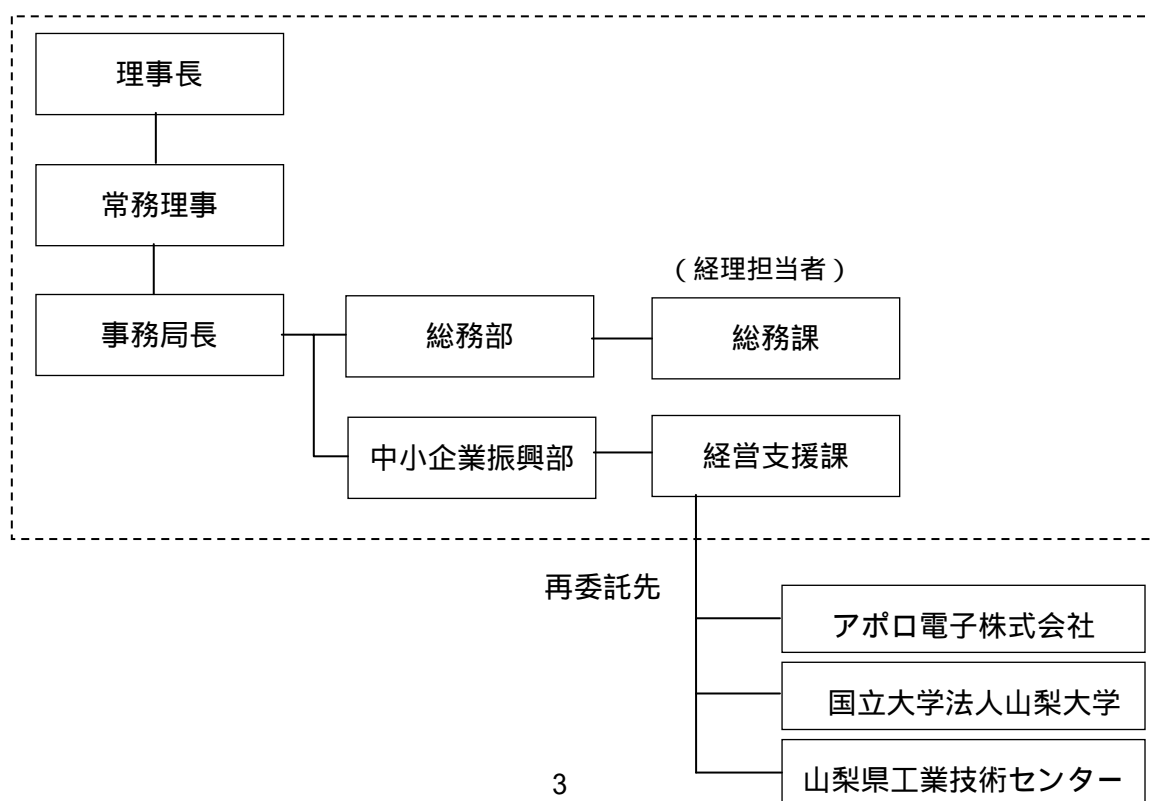
（1）研究組織及び管理体制

1）研究組織（全体）



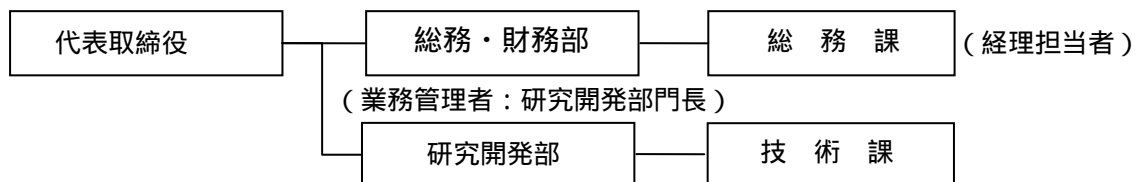
2）管理体制

事業管理機関 [公益財団法人やまなし産業支援機構]

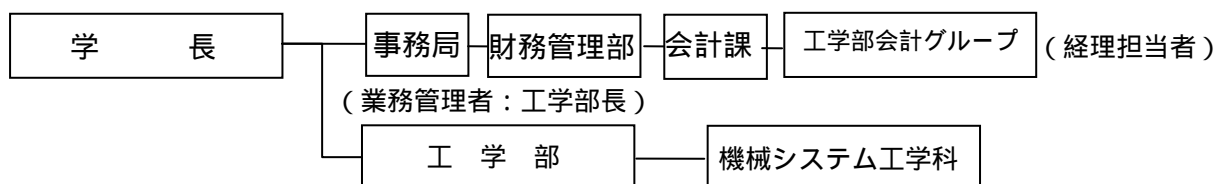


再委託先

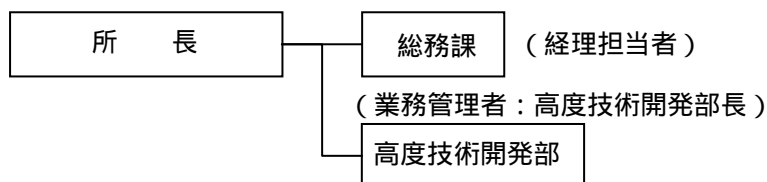
[アポロ電子株式会社]



[国立大学法人山梨大学]



[山梨県工業技術センター]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】公益財団法人やまなし産業支援機構

管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
廣瀬 正文	理事長	【5】
手塚 伸	常務理事	【5】
木之瀬 久司	新産業創造部次長	【5】
秋山 育也	新産業創造部新事業支援課課長	【5】
丹沢 竜介	新産業創造部新事業支援課主事	【5】

【再委託先】

研究員

アポロ電子株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
岩坂 聡	代表取締役	【1】【2】【3】【4】
久慈 照信	研究開発部門長	【1】【2】【3】【4】
森田 大	研究開発部技師	【2】
小屋 聖	研究開発部研究員	【1】【2】【4】

国立大学法人山梨大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
萩原 親作	国立大学法人山梨大学 工学部 機械システム工学科教授	【1】【2】【4】

山梨県工業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小松 利安	高度技術開発部 主任研究員	【3】
鈴木 大介	高度技術開発部 研究員	【3】

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人やまなし産業支援機構

(経理担当者) 総務部総務次長 清水 義富

(業務管理者) 理事長 廣瀬 正文

(再委託先)

アポロ電子株式会社

(経理担当者) 総務・財務部 総務課 中込 保波

(業務管理者) 研究開発部門長 久慈 照信

国立大学法人山梨大学

(経理担当者) 工学部会計グループ係長 浅川 辰仁

(業務管理者) 工学部長 豊木 博泰

山梨県工業技術センター

(経理担当者) 総務課 副主査 中村 直樹

(業務管理者) 高度技術開発部 部長 阿部 正人

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
久慈 照信	アポロ電子株式会社 研究開発部門長	PL
萩原 親作	国立大学法人山梨大学 工学部機械システム工学科教授	SL
小松 利安	山梨県工業技術センター 高度技術開発部主任 研究員	
鈴木 大介	山梨県工業技術センター 高度技術開発部研究員	
岩坂 聡	アポロ電子株式会社 代表取締役	
森田 大	アポロ電子株式会社 研究開発部技師	
小屋 聖	アポロ電子株式会社 研究開発部研究員	
原田 繁	ルネサスエレクトロニクス株式会社甲府事業所 工場長	アドバイザー
北原 将裕	ルネサスエレクトロニクス株式会社甲府事業所 品質管理課	アドバイザー
丹沢 竜介	公益財団法人やまなし産業支援機構 主事	事務局

1 - 3 成果概要

半導体シリコンウエハの加工において良品を安定して提供するため次世代型炭砥石開発に基づく低ダメージ加工の実現と光散乱法によるサブミクロンでの診断装置の開発を目指して、以下の項目について成果が得られた。

1) シリコンウエハ研磨用炭砥石の開発における成果概要

炭砥石開発では炭の研磨材（砥粒）としての可能性を発見した。その根拠として

- (1) 炭は粉碎で粒径は小さくなるが、やがて寸法効果により一定値に近づく傾向を示す。これが砥粒としての粒度（粒径）と考える。
- (2) 炭は破碎を繰り返して、粒径が小さくなくても、そのシャープさが保持される。そのため切れ味は期待できる。
- (3) 研磨材としての加工範囲は狭く、今回用いた木炭では普通砥粒の粒度 2000 番以上の仕上げ加工用に適する。

シリコンウエハの低ダメージ加工に炭が適合することが示された。

これにより炭砥石の開発を達成する成果が得られた。

2) 開発砥石を用いた加工法実験における成果概要

加工法確立には研磨条件についてスピンドル回転数、チャック回転数、切り込み速度のそれぞれを変化させ加工実験を行った。

- (1) 最適な加工条件により表面粗さ $Ra = 2nm$ 程度までの面に仕上げることができた。これは鏡面に仕上げられて市販されているシリコンウエハに近い値である。
- (2) スピンドル回転数が 2000rpm 以上であれば鏡面に仕上げることが出来る。

これにより加工法の確立の開発を達成する成果が得られた。

3) ウエハダメージの分析における成果概要

シリコンウエハの加工変質層が、従来加工品と比較してどの程度発生しているのか、測定・分析する評価技術について検討した。その結果、次の成果が得られた。

- (1) 「斜め研磨法を用いた評価方法」と「ラマン分光分析を用いた評価方法」について検討を行い、その有用性を確認した。
- (2) 炭砥石を用いた研磨面は、従来のエッチング加工面と比較してもほとんど差異がなく、高品位の仕上げ加工面が得られることが分かった。
- (3) 3点曲げによる抗折強度からも従来のエッチング面と比較してもほとんど差異はなく、同等の抗折強度があることが分かった。

これによりシリコンウエハダメージ分析の開発を達成する成果が得られた。

4) 自動ウエハ診断装置の開発における成果概要

ウエハ診断装置の研究開発では、レーザ光散乱法により反射光からの出力電圧の違いからウエハ表面の傷の有無及び表面粗さの測定を非接触で行う。基本原理は投光部から照射されたレーザ光は、ワークで散乱光、正反射光となり受光部にて感知される。

受光部からの信号は、増幅部にて増幅され、その信号をオシロスコープにてモニタすることができる。判定部に出力電圧に閾値を設け良・不良の判定をする。ウエハは円形であるので、回転させることでシリコンウエハ全体を検査するのが最良であった。

開発機の能力は次の通りである。

(1) 傷平均値幅 15.3 μm の傷において周速 52.4mm/s までは、100%の傷検出率が得られた。

(1) 非接触で 1 μm という微小な厚さまで測定できた。

(2) 非接触で触針式表面粗さ計と同等の測定ができた。

これによりウエハ診断装置の開発を達成する成果が得られた。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

連絡先・連絡担当者	住所
アポロ電子株式会社 研究開発部門長 久慈 照信	〒400-0212 山梨県南アルプス市下今諏訪610 電話番号 055-284-4881
国立大学法人山梨大学 工学部機械システム工学科教授 教授 萩原 親作	〒400-8512 山梨県甲府市武田4-3-11 電話番号 055-220-8457
山梨県工業技術センター 高度技術開発部 主任研究員 小松 利安	〒400-0055 山梨県甲府市大津町2094 電話番号 055-243-6111
公益財団法人やまなし産業支援機構 新産業創造部新事業支援課 主事 丹沢 竜介	〒400-0055 山梨県甲府市大津町2192-8 電話番号 055-243-1888

第2章 シリコンウエハ研磨用炭砥石の開発

2-1 木炭の粉碎による粒径の変化

用いた針葉樹の木炭の表面の様子を図1に示す。表面には数ミクロンサイズの気孔が数多く存在する様子が分る。そして気孔は3~5 μm 程度間隔を保ちながら存在している。多くの気孔の存在は、利点としてチップポケット、放熱作用には有利であろうが、破碎の起点となることの方がより問題が大きいと思われる。いわゆる炭の脆さが研磨材としての粒度の管理を難しくすると思われる。先ず炭の塊から粉碎させメッシュサイズが20ミクロンのフルイを通過した炭を用意した。その後ボールミルにより最大20時間

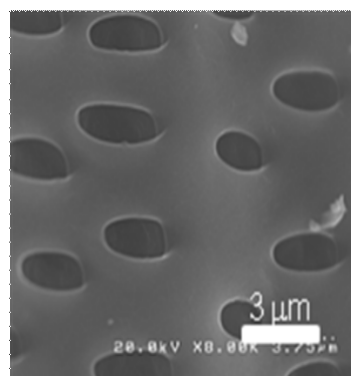


図1 炭の表面

かけて粉碎させた。図2は粒径分布が粉碎時間でどのように推移するかを示し、(a)は長径、(b)は短径についてである。サンプル数は全て150個である。さらに図3はその平均粒径についての推移を示す。全体として粒径は徐々に減少し、その後安定する様子を示した。すなわち図1の気孔のピッチから考えられる粒子径が3~5 μm 程度(穴ピッチ以下)となるまでは、破碎しやすく、それ以下では、破碎が起こり難くなる様子が分った。このことより炭を研磨材として使用する場合、粒度は狭い範囲にしか存在せず、今回の場合では#2000~#3000が初期の研磨材粒度と考えるべきである。換言すれば炭を研磨材として用いる場合、普通砥粒のように数多くの初期の粒度は存在しない。ただし木材の種類が異なれば気孔の大きさや分布状態も異なるため、研磨材としての初期の粒度は異なると思われる。本研究ではこのサイズを初期加工砥粒径(粒度)と呼ぶ。

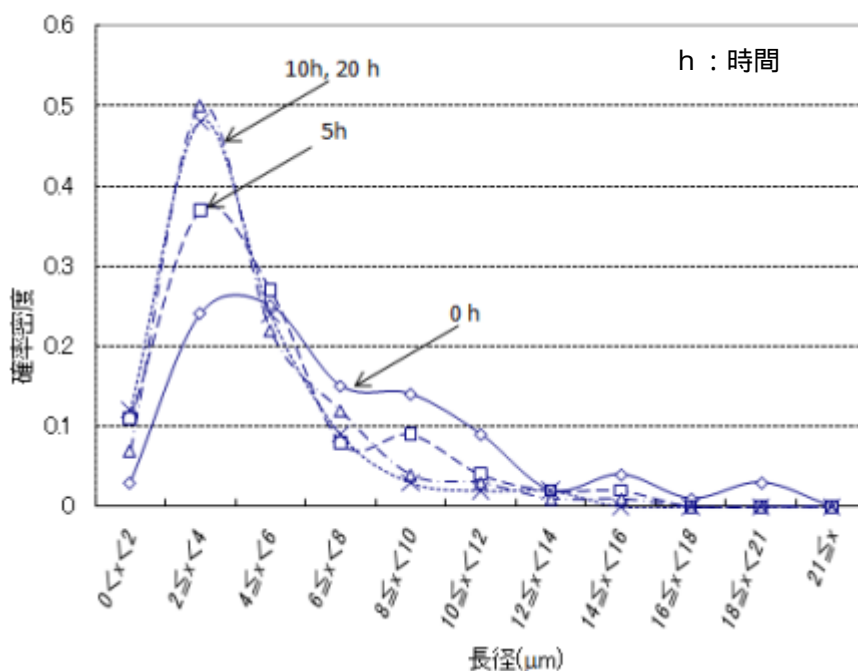


図2 粉碎による粒径分布の推移(a)長径の分布

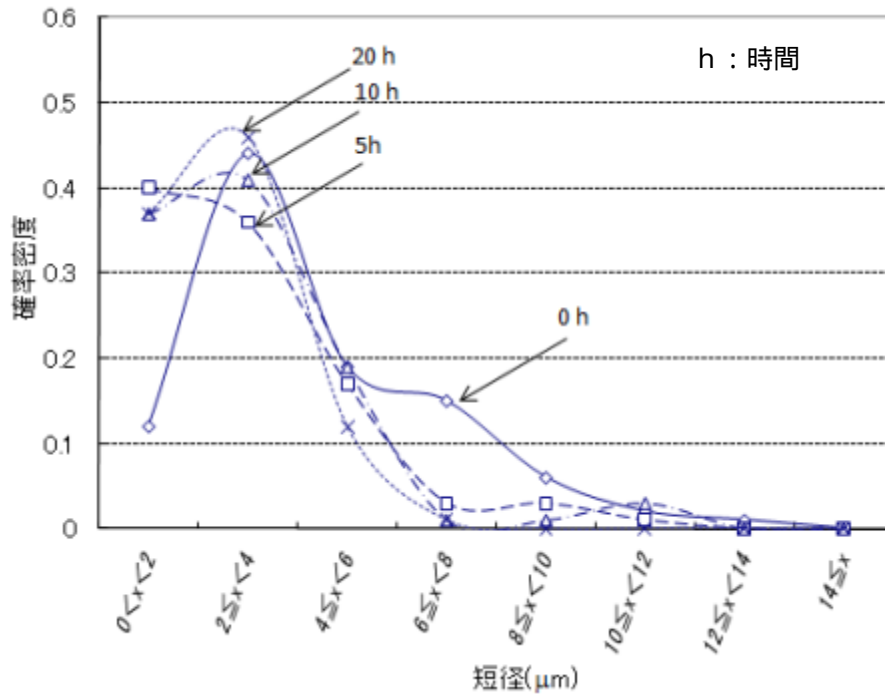


図2 粉碎による粒径分布の推移(b)短径の分布

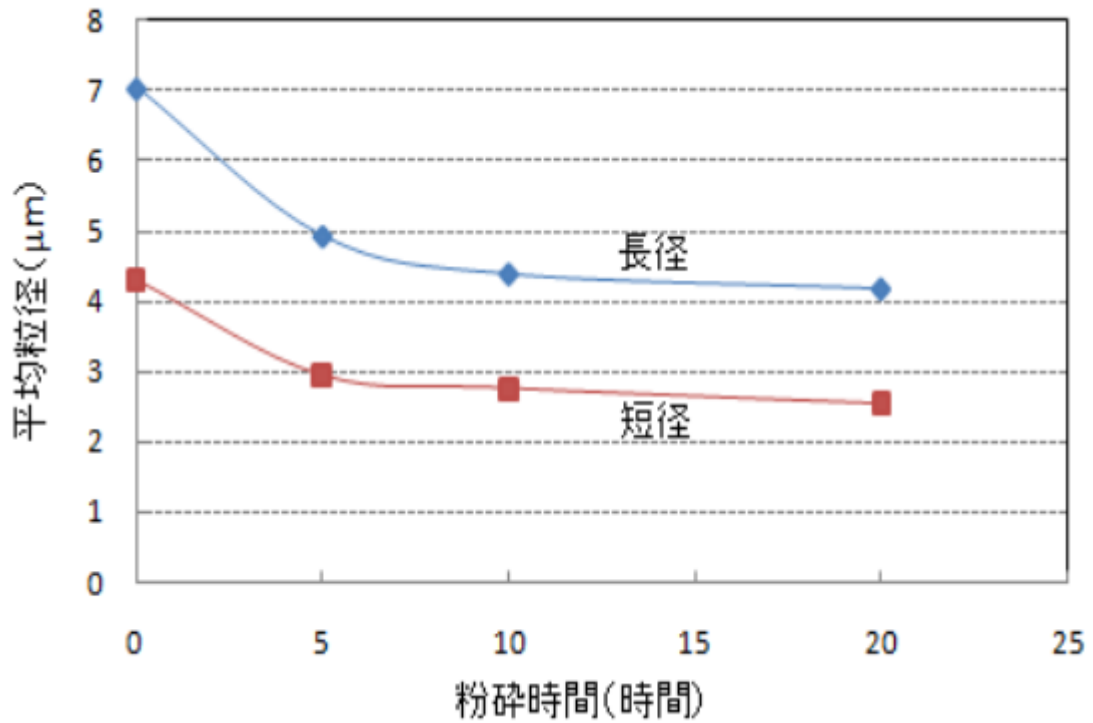


図3 平均粒径推移

2-2 粉砕に伴う粒子形状の変化

砥粒破碎による切れ刃形状は工具としての切れ味を支配する。そこで粉砕に伴う炭の形状を観察した。その例を図4に示す。炭の形状は初期において非常にシャープと言える。さらに20時間粉砕させたときの形状もそのシャープさが失われない。これは炭には高い切削能力が期待できると思われる。普通砥粒と比べてもシャープさが良く分るところである。

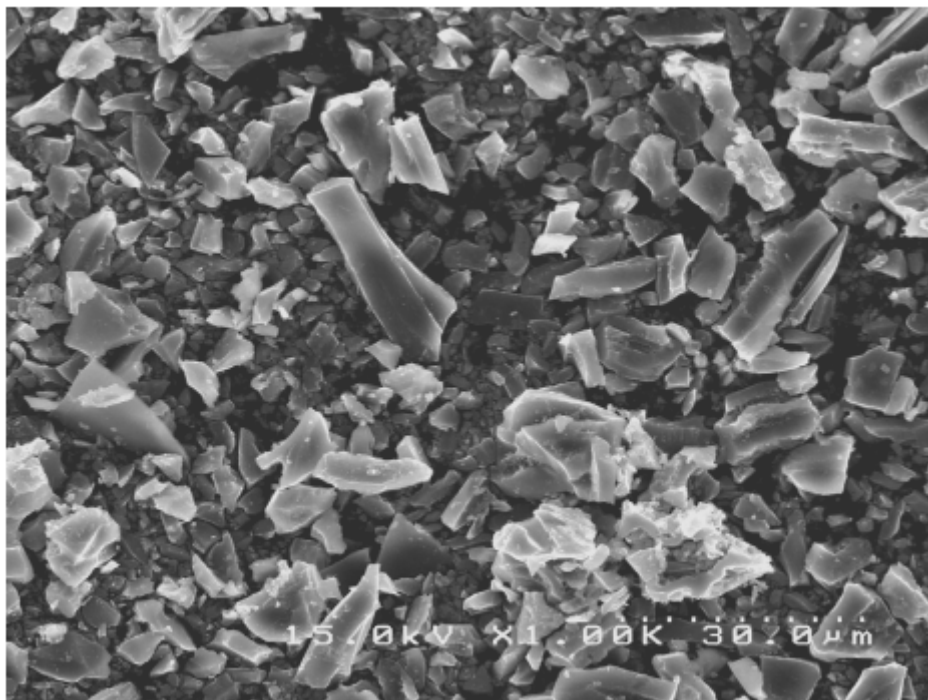


図4 (a) 炭粉砕前の電子顕微鏡写真

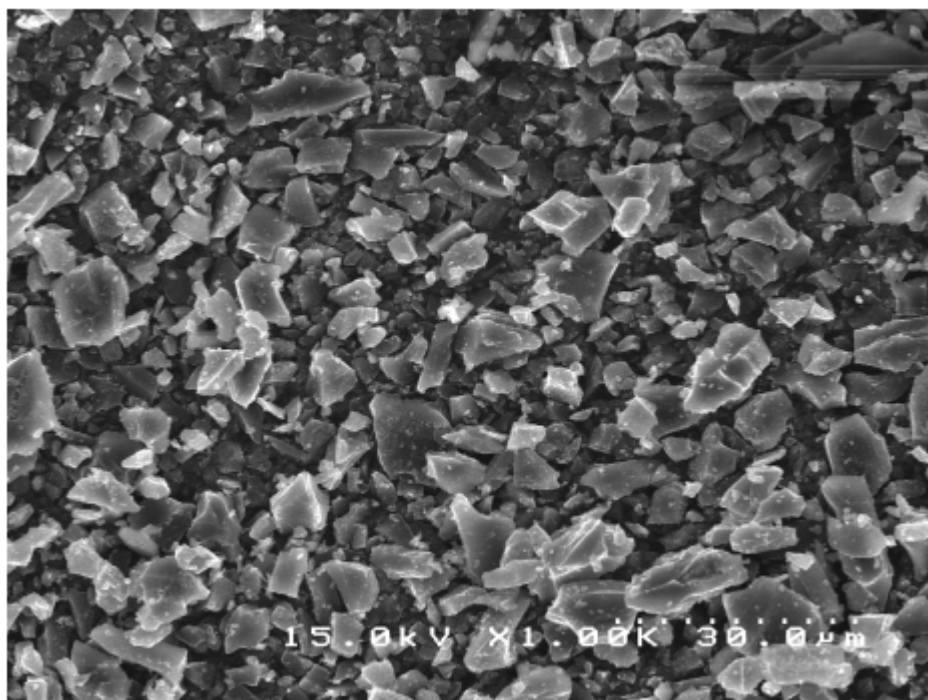


図4 (b) 5時間ボールミル粉砕後の電子顕微鏡写真

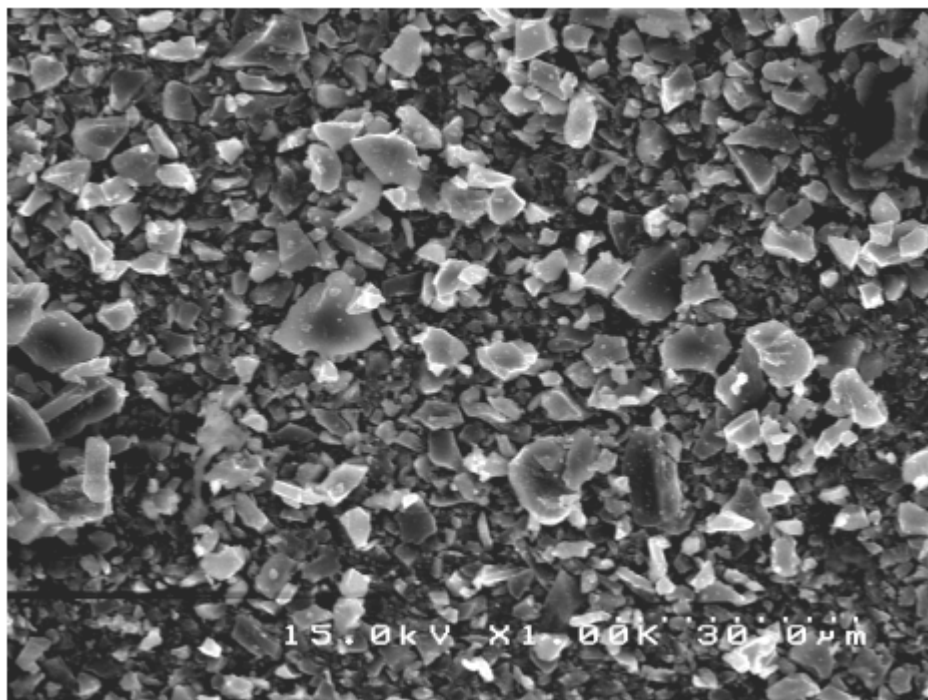


図 4 (c) 1 0 時間ボールミル粉碎後の電子顕微鏡写真

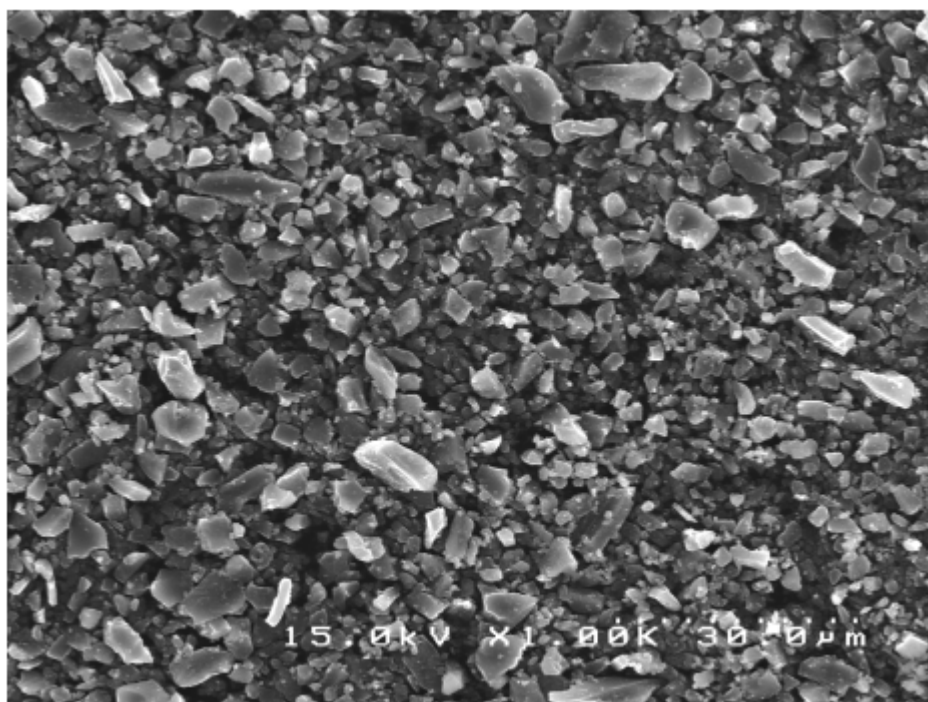


図 4 (d) 2 0 時間ボールミル粉碎後の電子顕微鏡写真

第3章 炭砥石を用いた加工実験

3-1 炭砥石の作製

本実験に使用した炭の電子顕微鏡写真を図5に示す。針葉樹の間伐材を1000で炭化させた白炭を細かく粉砕した後にフルイを用いて約40 μm 以下の大きさに選別した。その後、この炭と天然資源の結合材や他の添加剤を混ぜ合わせ、テフロン製の円柱状(15mm \times 8mm)の穴が32箇の中にこれを流し込み、プレス機により成形した。図6に製造方法を示す。そして、パレット状に作製した砥石をアルミホイールの穴の中に市販の固定用ボンドを用いて固定し図7のような多刃砥石を作製した。表1に今回製作した炭砥石の各種仕様を示す。(a)~(f)に要した時間は3日であった。

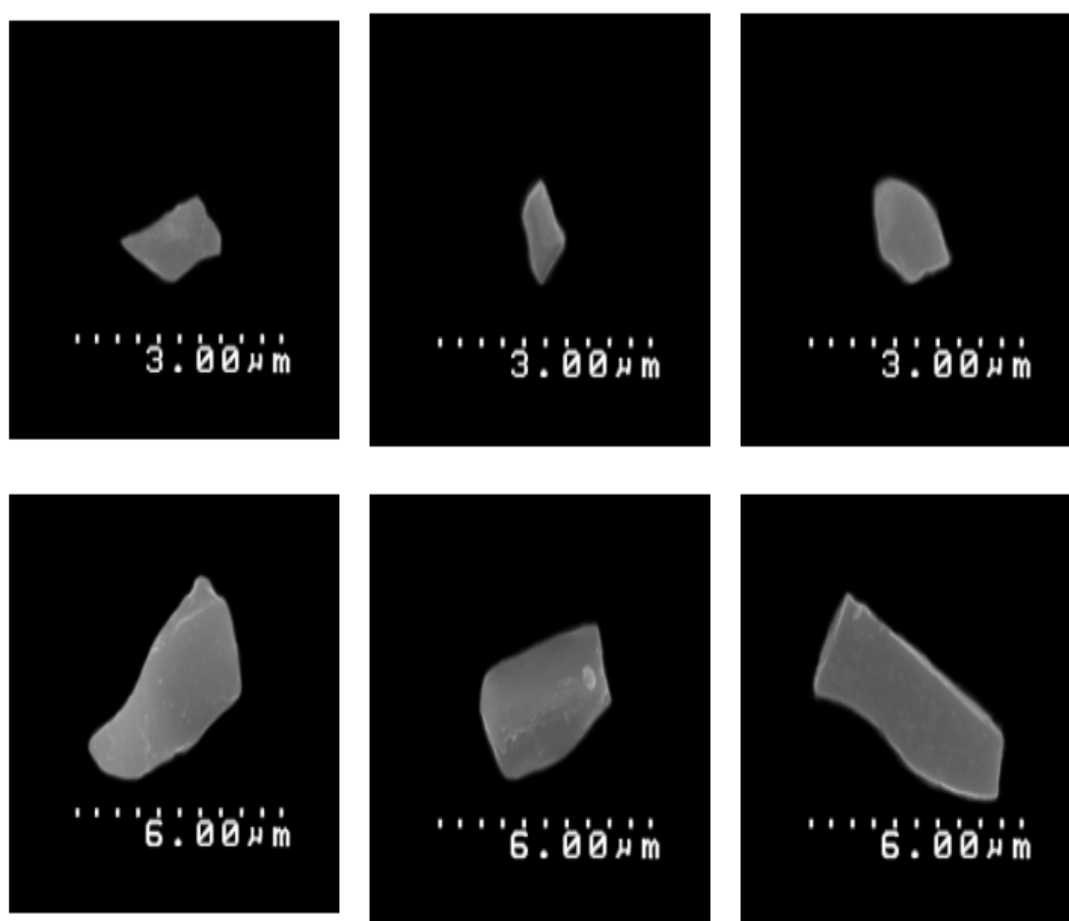


図5 粉砕後の炭砥粒形状

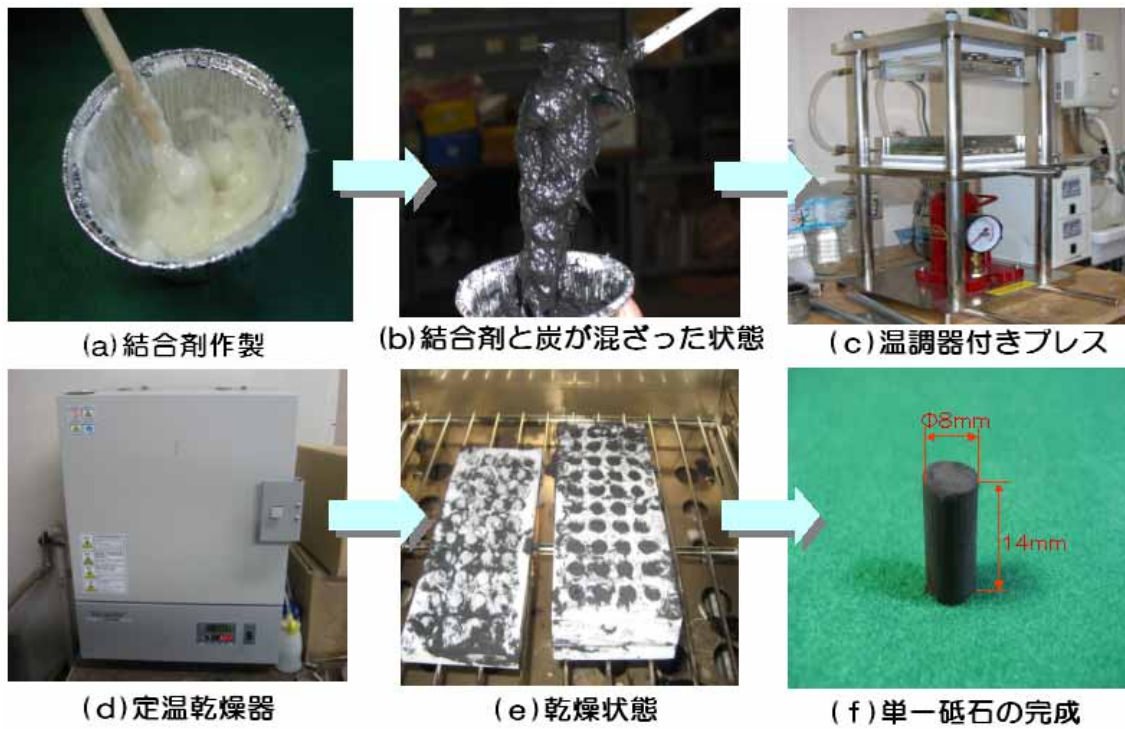


図6 炭砥石製造方法



図7 多刃炭砥石

表1 炭砥石各種データ

外形	ホイール径 $\phi 150\text{mm}$ 36個のペレット状
炭の種類	針葉樹間伐材（白炭） （炭化温度 1000°C ）
ヤング率	$1.1 \times 10^8 \text{ Pa}$
密度	0.55 g / c m^3
炭平均粒径	長径： $7.04 \mu\text{m}$ 短径： $4.29 \mu\text{m}$

3-2 加工条件と表面粗さの関係

加工条件を、スピンドル回転数（1000,2000,3000rpm）ワーク回転数（100,200,300rpm）、切り込み速度（50、100、150 μ m/min）とそれぞれ変え、研磨後の表面粗さを確認した。また、乾式での研磨を行うため研磨中のウエハ表面温度についても確認した。

図8の通りスピンドル2000rpm以上で表面粗さRa=2nmとほぼ鏡面に仕上げられる。図9の通り発熱量が一番大きいと予想できるスピンドル回転数3000rpmにおいても40 未満で推移しており、ワークへの影響はほとんど無いものと思われる。

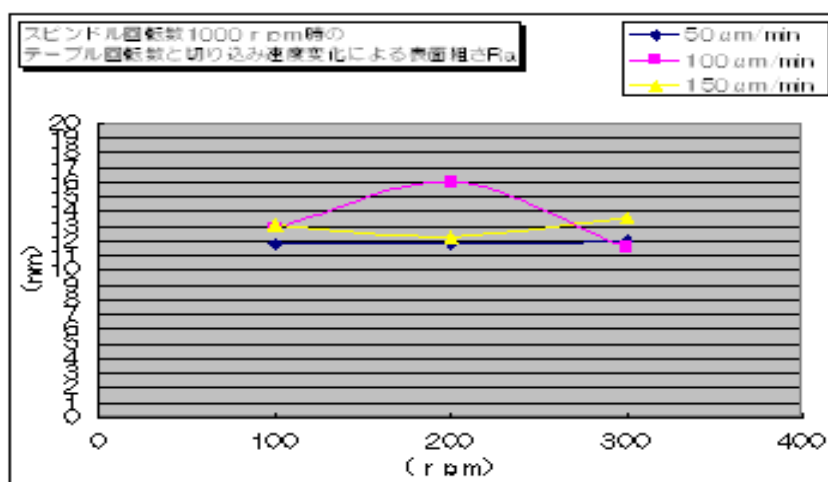


図8 スピンドル回転数1000rpmにて研磨後の表面粗さRa

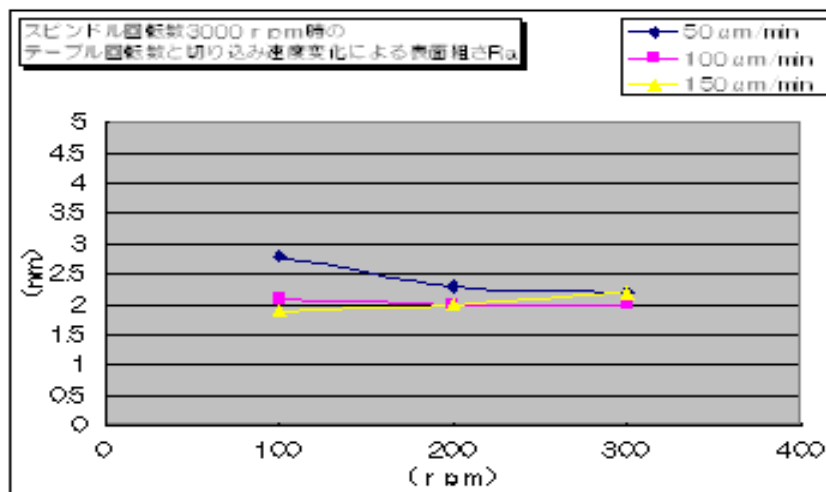


図8 スピンドル回転数3000rpmにて研磨後の表面粗さRa

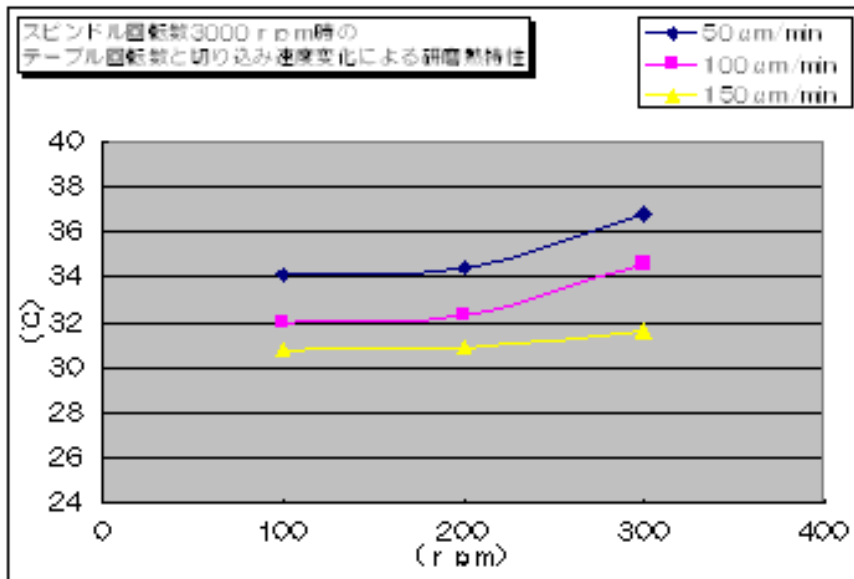


図9 スピンダル回転数 3000rpm にて研磨中のウエハ表面温度

3-3 研磨加工実験

被加工材料には市販されている6インチ厚さ0.6mmのシリコンウエハを用い、ダイヤモンド砥石#2000により初期表面粗さを揃えた面に対して研磨加工した。研磨加工には平面研削盤(図10)を用い、スピンドル回転数1000~3000rpm、切り込み速度50~150μm/minまで変化させて、切り込み量一定の30μm及びテーブルの回転数は300rpmとし、加工液は用いずに乾式にて研磨加工を行った。加工前後の表面粗さはカラー3Dレーザー顕微鏡(キーエンスVK-8700)を用いてnmレベルで高精度に測定した。図11のグラフにスピンドル回転数に対する表面粗さの関係をまとめた。その結果、初期表面粗さRa=13.0nmであるのに対してスピンドル回転数1000rpmの時には表面荒れの改善はほとんど見られないものの2000rpm及び3000rpmの高速回転の時には約2nmまでの非常に高精度な面に仕上げられていることが分かった。

走査型白色干渉計(ZYGO社製 NewView6300)を用いてさらに高精度に表面形状を評価した。図12は研磨前後のシリコンウエハと鏡面に仕上げられて市販されているシリコンウエハを走査型白色干渉顕微鏡を用いて評価した。研磨前数十nm程度の凹凸が研磨後には数nm程度にまで仕上げられており、鏡面に高精度研磨されて市販されている面に近いものが得られた。

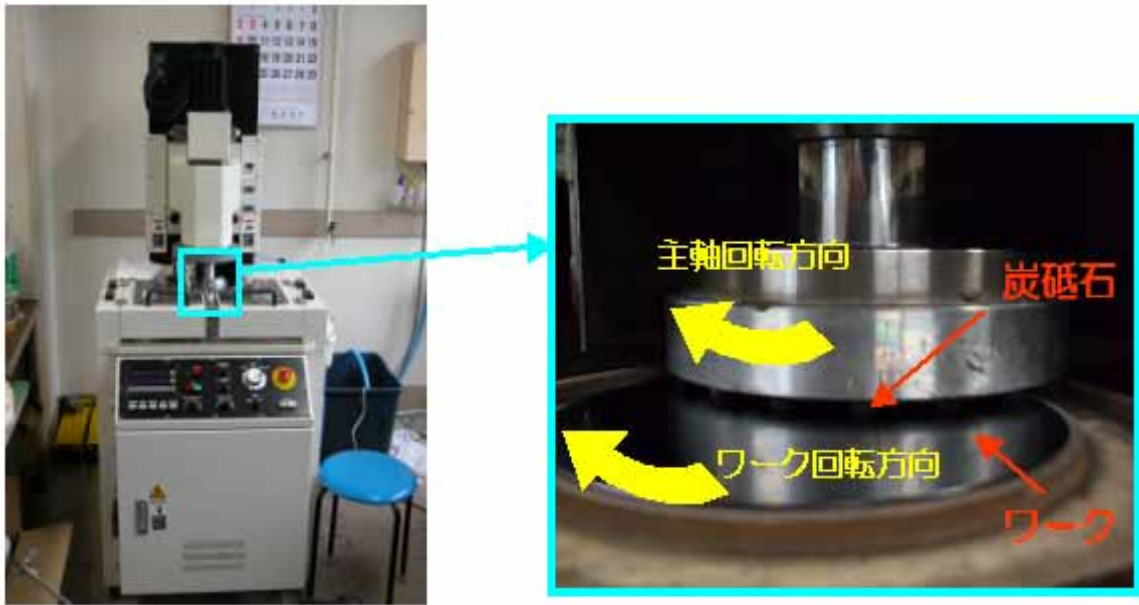


図 1 0 平面研削盤と加工の様子

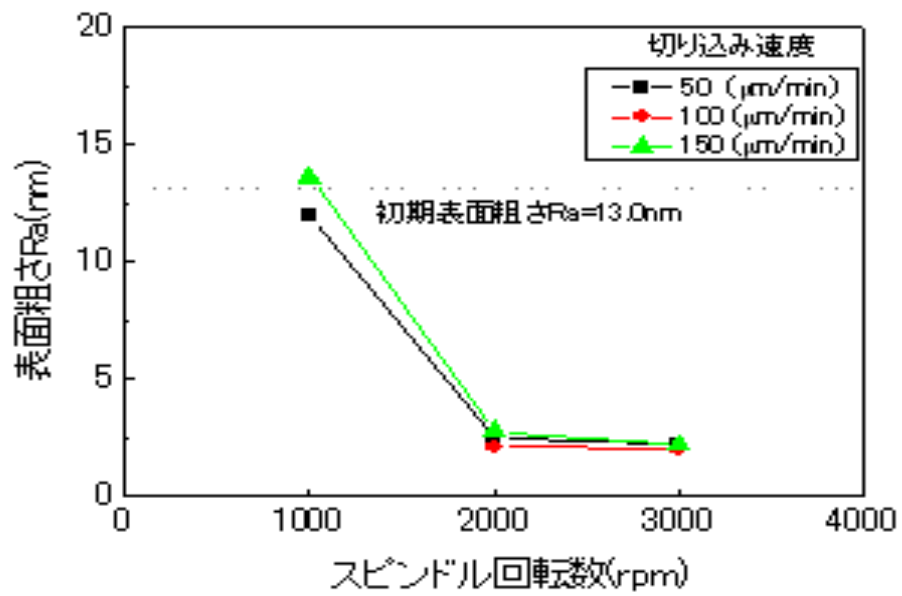


図 1 1 スピンドル回転数と表面粗さの関係

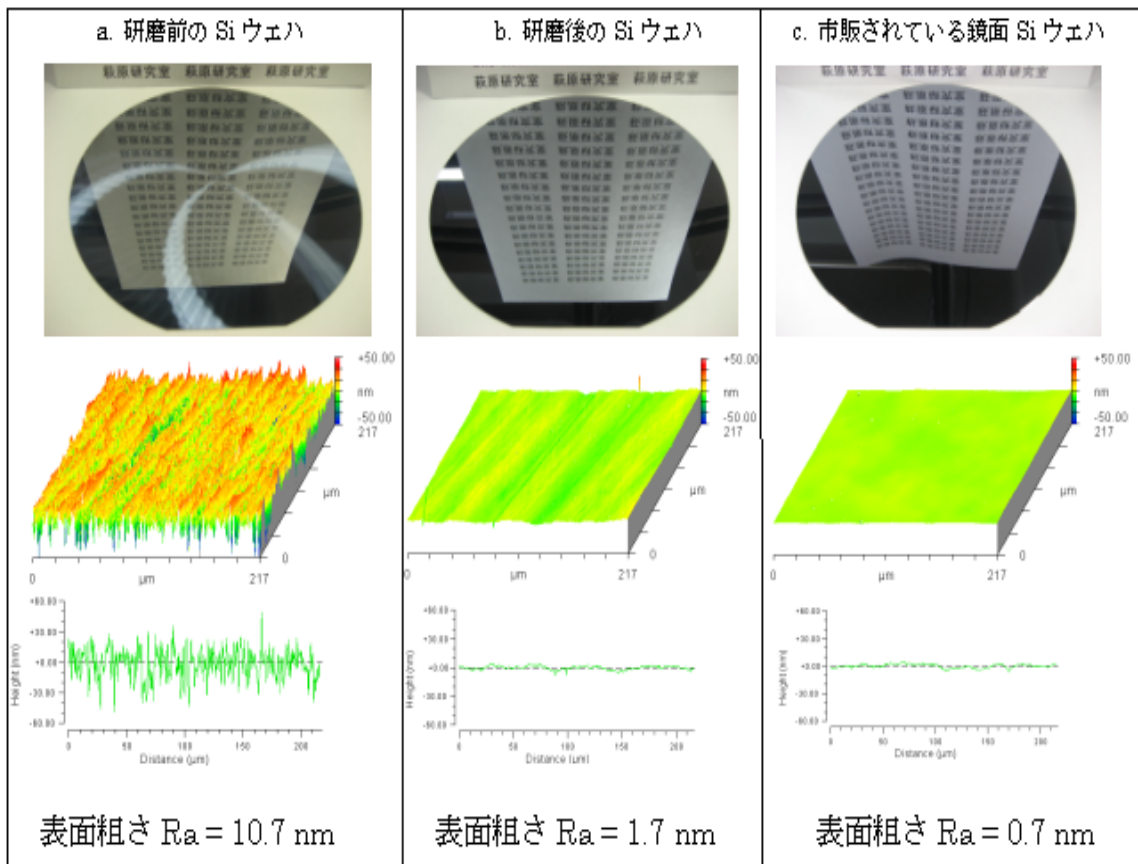


図 1 2 炭砥石を用いて研磨した前後のシリコンウェハ表面形状

第4章 炭砥石が及ぼすウエハへのダメージ

4-1 ウエハ表面の損傷

シリコンウエハは高品位の仕上加工面が要求されているため、その表面は図1に示すような加工変質層が存在しないよう加工する必要がある。本研究で開発する炭砥石は、最終仕上加工に用いるため、加工変質層が従来加工品と比較してどの程度発生しているのか、正確に測定・分析する評価技術の確立が必要である。そこで、様々な方法を調査し、加工されたシリコンウエハの評価を実際に行い、その有用性について検討した。本研究では、()斜め研磨法を用いた評価方法と()ラマン分光分析を用いた評価方法次の2種類の方法で評価した。

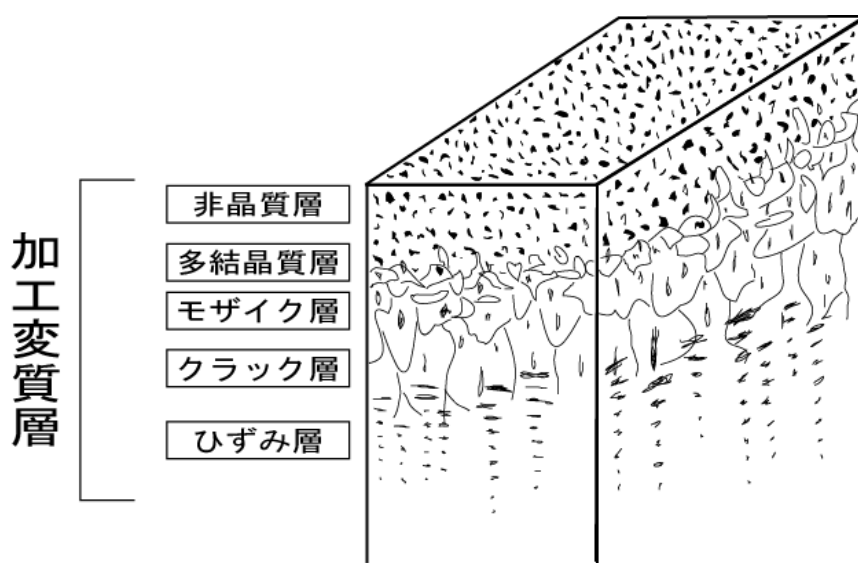


図13 加工変質層の概念図

炭砥石の評価を行う前に、各評価方法でシリコンウエハの加工変質層を測定すると、どのような特性データが得られるか検討する必要がある。そこで、市販のダイヤモンド砥石の#360と#1000、および#1500で研磨加工した評価用試料を準備した。試料の加工条件は、砥石回転数：5500rpm、切込速度：0.3μm/secである。従来の最終仕上加工であるエッチング面も含めた4種類の評価用試料について比較・検証を行った。各試料の表面粗さは次のとおりである。なお、シリコンウエハの厚さは0.6mmで統一した。

# 360の場合	: 351.34nmRa
# 1000の場合	: 20.61nmRa
# 1500の場合	: 9.16nmRa
エッチング面の場合	: 0.27nmRa

最初に、加工変質層をクラック長さとして数値的に評価する方法として、古くから使

用され実績のある斜め研磨法を用いて、実験を行った。図14に示すように、試料断面に 5° の傾斜を付けると、断面方向に発生する亀裂等が、約1.1倍に拡大され視覚的に観察しやすくなる点が、斜め研磨法のメリットである。

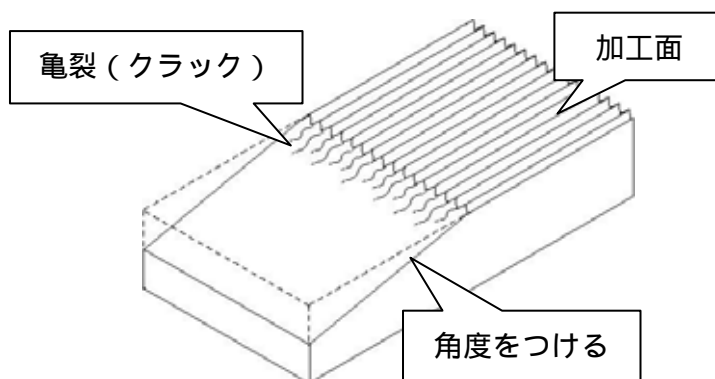
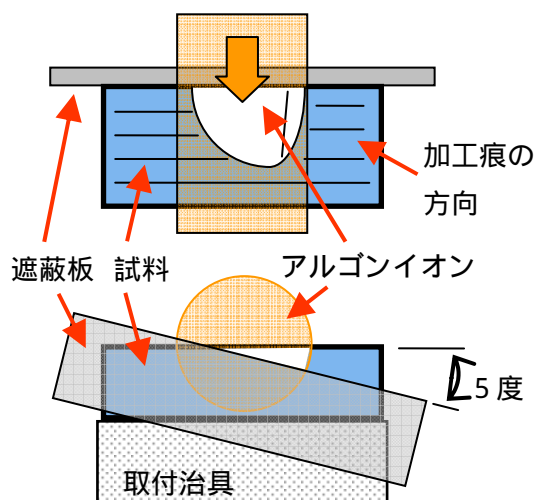


図14 斜め研磨面の概念図

従来は、試料を傾斜治具に固定し、試料研磨装置を用いて研磨加工する前処理を行っていた。しかし、機械的な研磨加工自体が、加工変質層を発生する可能性もあり、注意が必要であった。そこで、本研究では、アルゴンガスをイオン化して試料に噴き付け、イオンミーリングを行うクロスセクションポリッシャ(日本電子製:SM-09010)を使用した。図15(a)に装置外観を示す。また、試料は図15(b)に示すように傾斜させて設置し、上面に金属製遮蔽版をのせて、上からアルゴンイオンガスを噴き付けた。イオンの加速電圧は5kV、加工時間は12時間で一定とした。更に、クラックの観察を容易にするために、斜め研磨面を1mol/lのNaOH水溶液で2時間、アルカリエッチングを行った。



(a) 装置外観図



(b) 試料固定方法

図15 クロスセクションポリッシャ

5°の角度で斜め研磨した試料を走査型電子顕微鏡（日本電子製：JXA-8900RL）で上面から観察し、クラック長さを顕微鏡上のスケールから読みとり、三角関数から断面方向の深さを算出して評価を行った。また、非接触で表面形状が測定できる、コンフォーカル顕微鏡（レーザテック製：H1200）で斜め研磨面の形状を確認した。使用した測定装置を図16に示す。



(a) 走査型電子顕微鏡

(b) コンフォーカル顕微鏡

図16 使用した測定装置

斜め研磨面の形状を測定した結果を図17に示す。イオンミーリングのため、斜め研磨面の下部は円錐状の形状をしているが、上部は5°の角度で傾斜していることが確認できた。

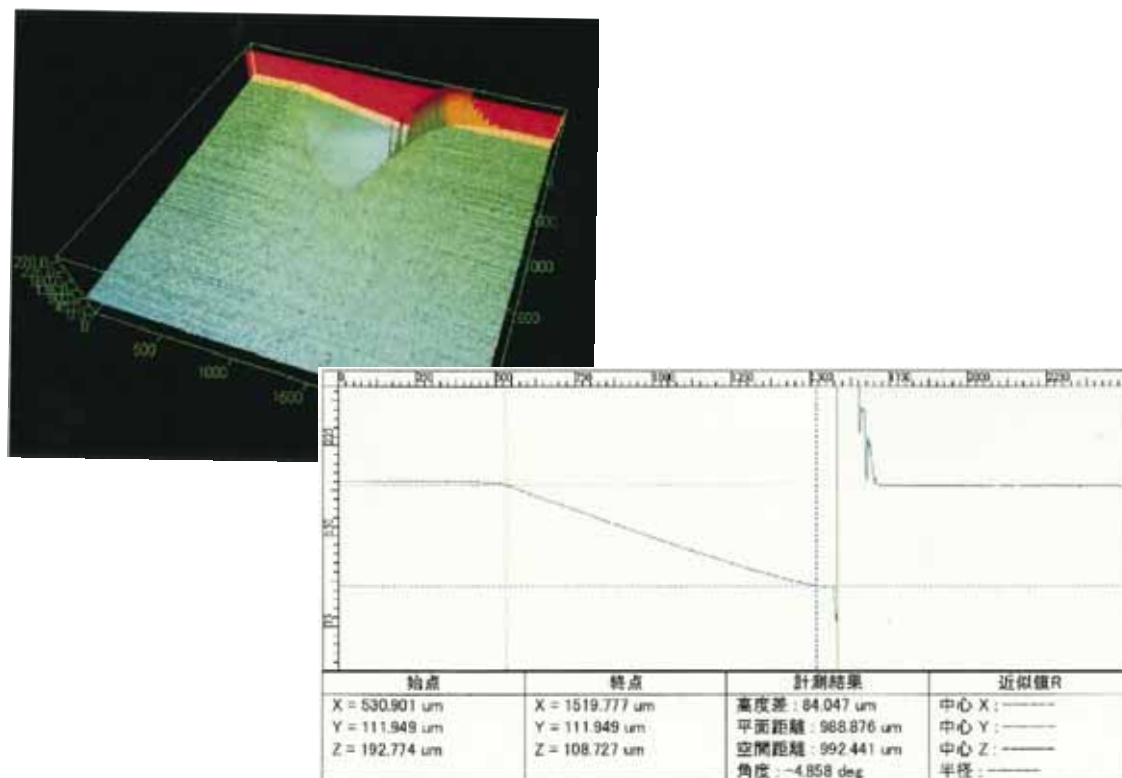
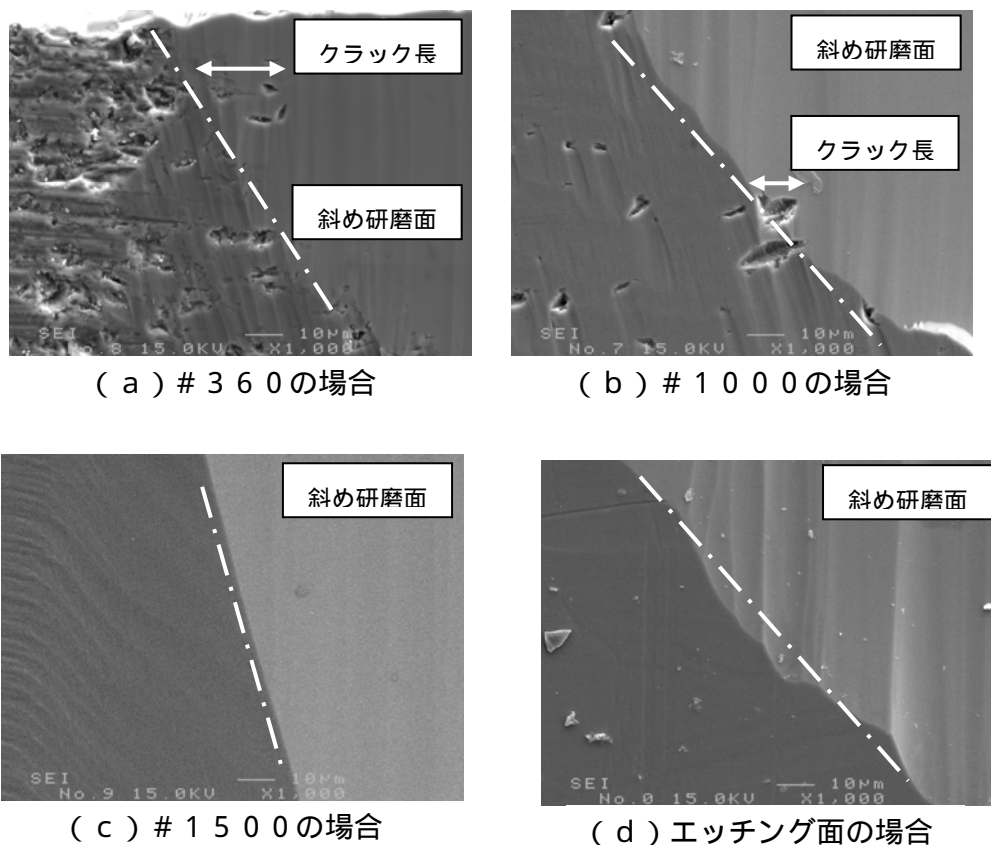


図17 斜め研磨面の形状測定結果

走査型電子顕微鏡を用いて観察した画像を図18に、算出したクラック長さの測定結果を図19に示す。クラック長さは、#360の場合で2 μm 程度、#1000の場合で1 μm 程度であった。#1500の場合とエッチング面の場合、本方法でクラックを観察することができなかった。



(a) #360の場合

(b) #1000の場合

(c) #1500の場合

(d) エッチング面の場合

図18 走査型電子顕微鏡画

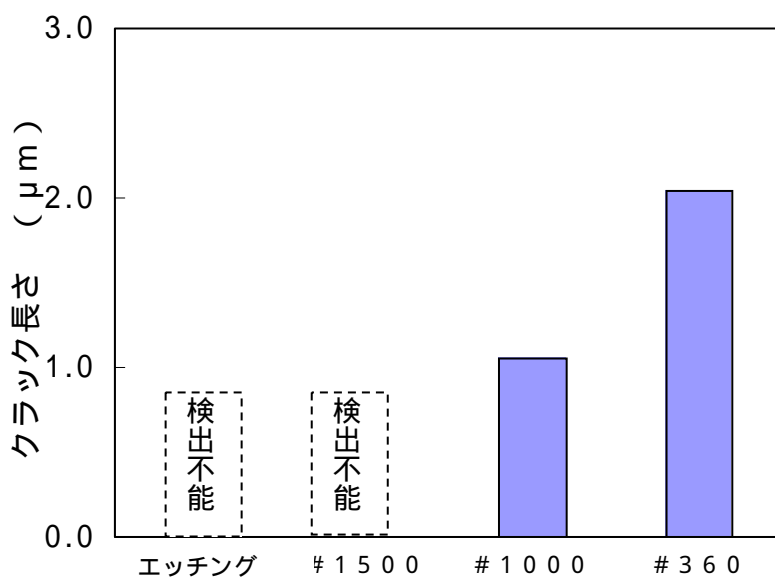


図19 クラック長さの測定結果

次に、ラマン分光分析方法を用いた方法について検討を行った。図20に本研究で使用したラマン分光分析装置(Renishaw製: inVia Raman Microscope)を示す。入射光源として波長532nmの半導体レーザを使用している。このレーザ光を試料表面に照射すると、その反射光の大半は入射光と同じ波長ではあるが、非常に弱いものの、入射光とは異なる波長の光が観測される現象がある。その光をラマン散乱光、波長のズレ量をラマンシフトという。このラマンシフトは、試料自体を構成する分子の振動によって発生しており、試料の種類によってどの程度の差が生じるか分かっている。分析例として、鏡面加工されたシリコンウエハを分析した場合の結果を図21に示す。国際規格により、横軸は波長の逆数になる波数(cm^{-1} : 1 cm 当たりの波の数)で表記する。シリコン自体のラマンシフトは約 520 cm^{-1} である。また、残留応力によるひずみが存在すると、ラマンシフトは無ひずみの場合より更にズレが発生することが知られている。図22に示すように、ラマンシフトが増加した場合は試料表面に圧縮応力が、逆に減少した場合は引張応力が作用していることを表している。



図20 ラマン分光分析装置

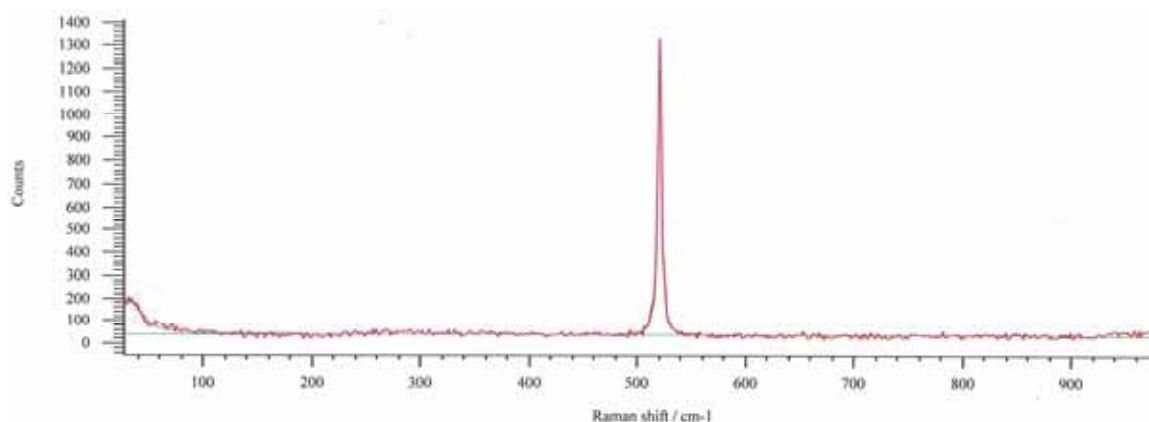


図21 鏡面加工したシリコンウエハのラマン分光分析例

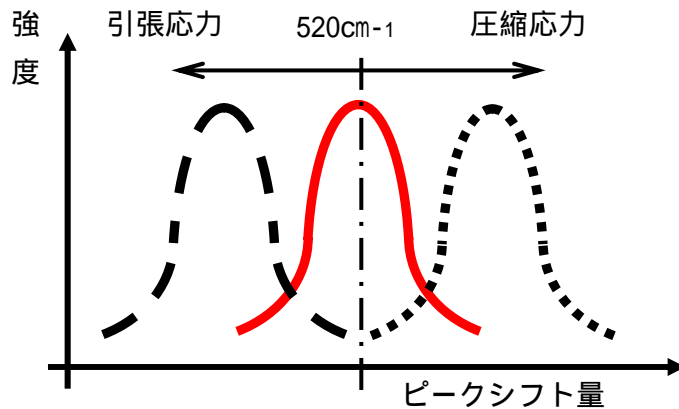


図 2 2 残留応力によるラマンシフト量の変化

表面粗さに対するラマンシフトの変化について測定した結果を図 2 3 に示す。縦軸は、ポリッシング面の場合のラマンピーク位置を基準点として、各表面粗さのラマンピークがどの程度シフトしたか、ピーク位置の差を示す。ラマンシフトは 6 回繰り返して測定を行った。表面粗さの値が大きくなると、ラマンピーク位置がプラス方向にシフトし、ウエハ表面に圧縮応力が発生していることが分かった。また、ダイヤモンド砥石 # 1 5 0 0 の場合、クラックは確認できなかったものの、ラマンシフトは 0.1 cm^{-1} 程度発生することが分かった。結晶構造レベルでのひずみが、加工表面に残留していると考えられる。

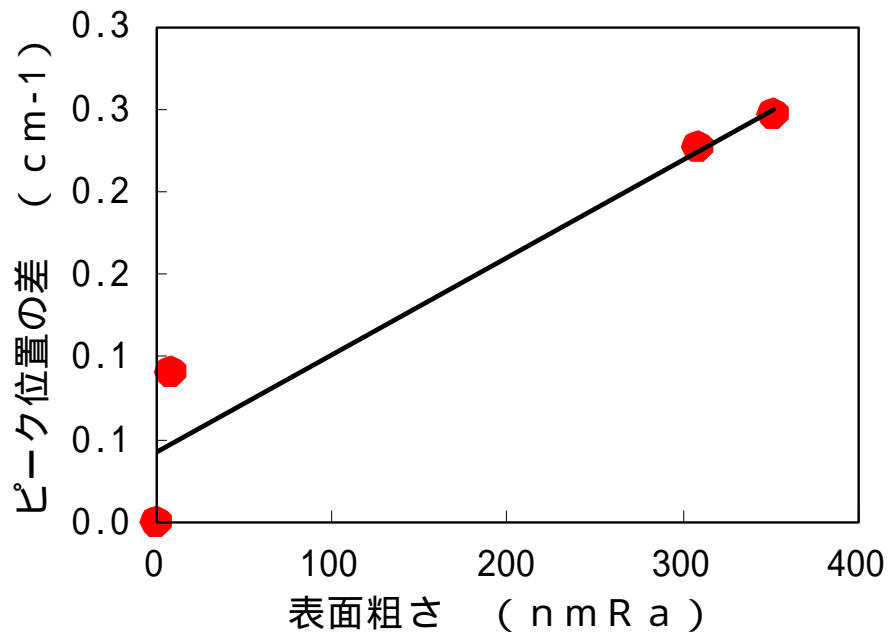


図 2 3 ラマンシフトの変化について

4-2 加工条件による表面粗さ

前述した2種類の方法で、本研究で開発した炭砥石の研磨加工面を評価した。斜め研磨法を用いた評価方法の結果を図24に、ラマン分光分析を用いた評価方法の結果を図25に示す。クラック長さに関しては、従来のエッチング面と同様、炭砥石による研磨加工面でも確認することができなかった。ラマン分光分析では、やはりラマンシフトが見られたが、#1500の場合よりシフト量は少なく、炭砥石による研磨加工により、高品位の仕上加工面が得られることが分かった。

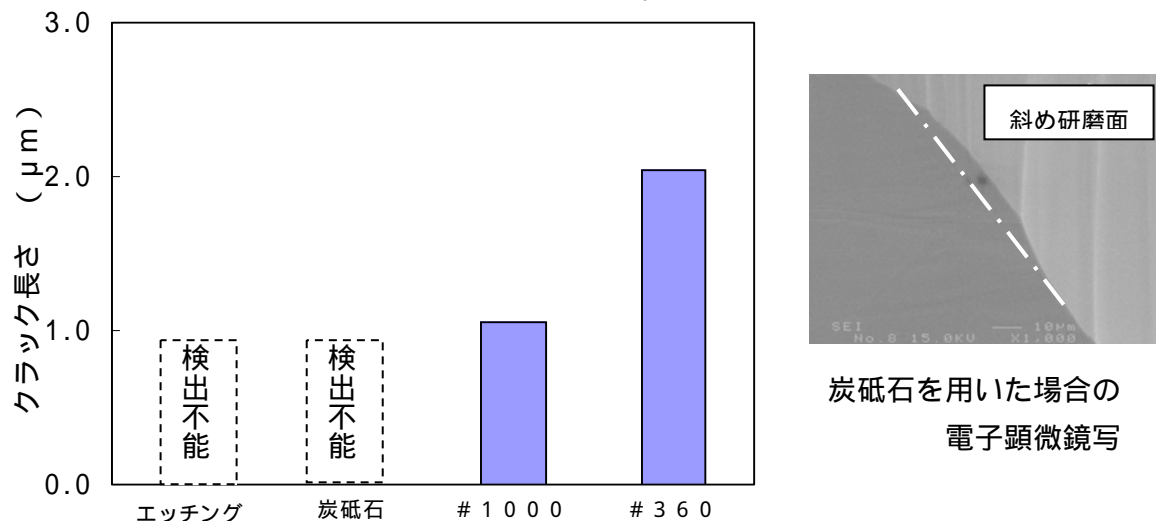


図24 斜め研磨法を用いた評価方法の結果

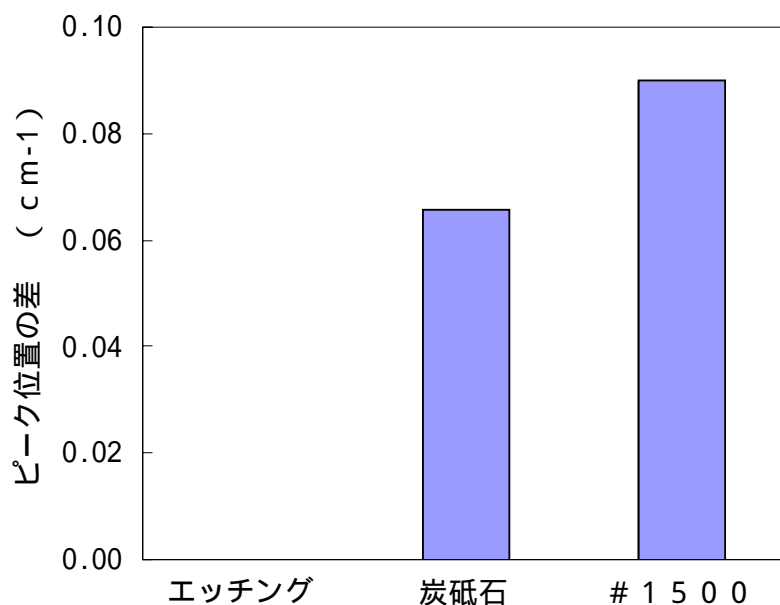


図25 ラマン分光分析を用いた評価方法の結果

4-3 3点曲げ試験による抗折強度

加工したシリコンウエハの分析評価として従来のエッチング処理ウエハと炭砥石研磨ウエハとの3点曲げによる抗折強度で分析比較した。

分析装置は島津製作所製の小型卓上試験機 EZ Graph-100N (図26)を使用した。

試料はそれぞれウエハの十字方向に計38個で300 μ m厚さ 7mmのものとした。

図27の式に基づき抗折強度を算出した。

その結果、ウエハ表面の十字方向(図28)での抗折強度(図29)では、優位差なしと判断できる。トータルの比較(図30)ではエッチング処理ウエハと炭砥石研磨ウエハでは、ほとんど差異は無く、十分にエッチング処理ウエハと同等レベルと判断できる。



図26 3点曲げ試験機拡大図

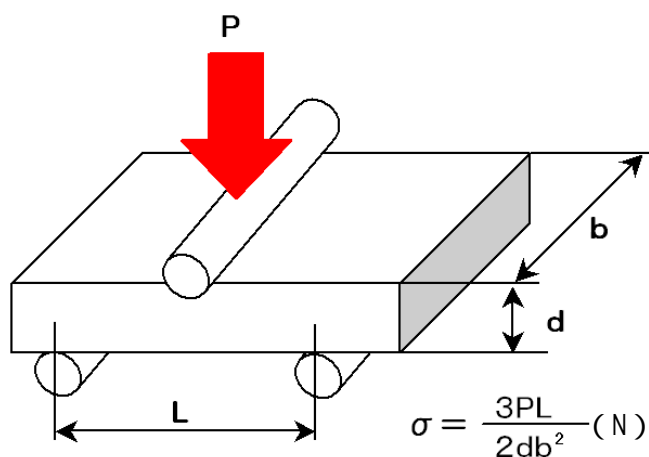


図27 3点曲げ模式図

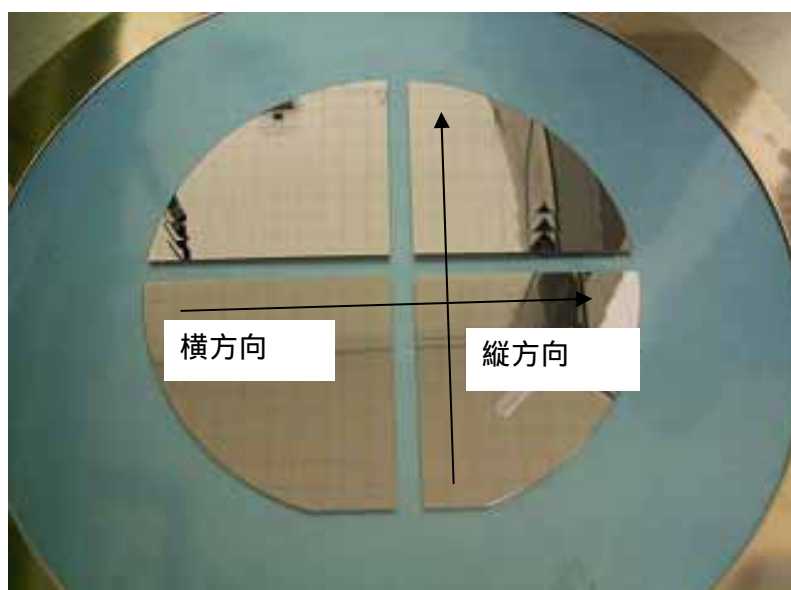


図28 ウエハ内十字抜き取り箇所

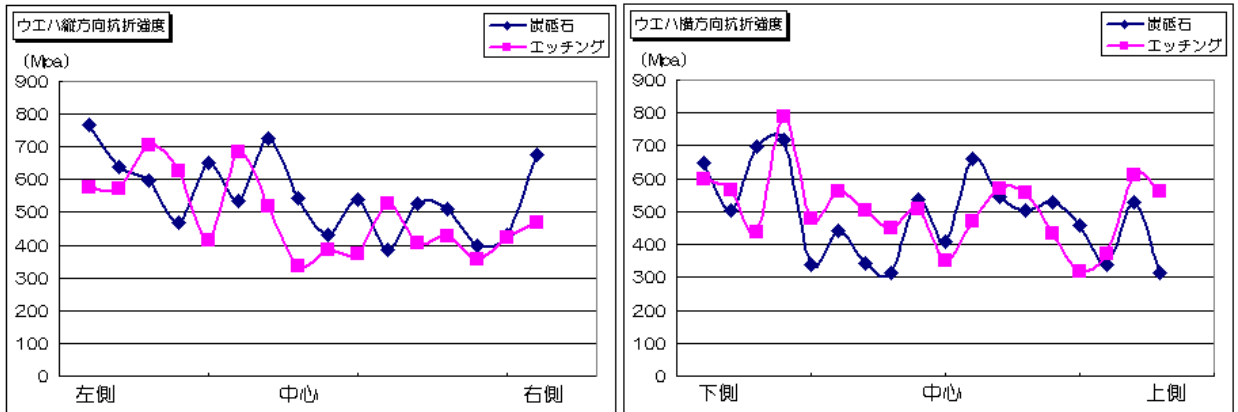


図 2 9 ウエ八面内縦横方向での抗折強度推移

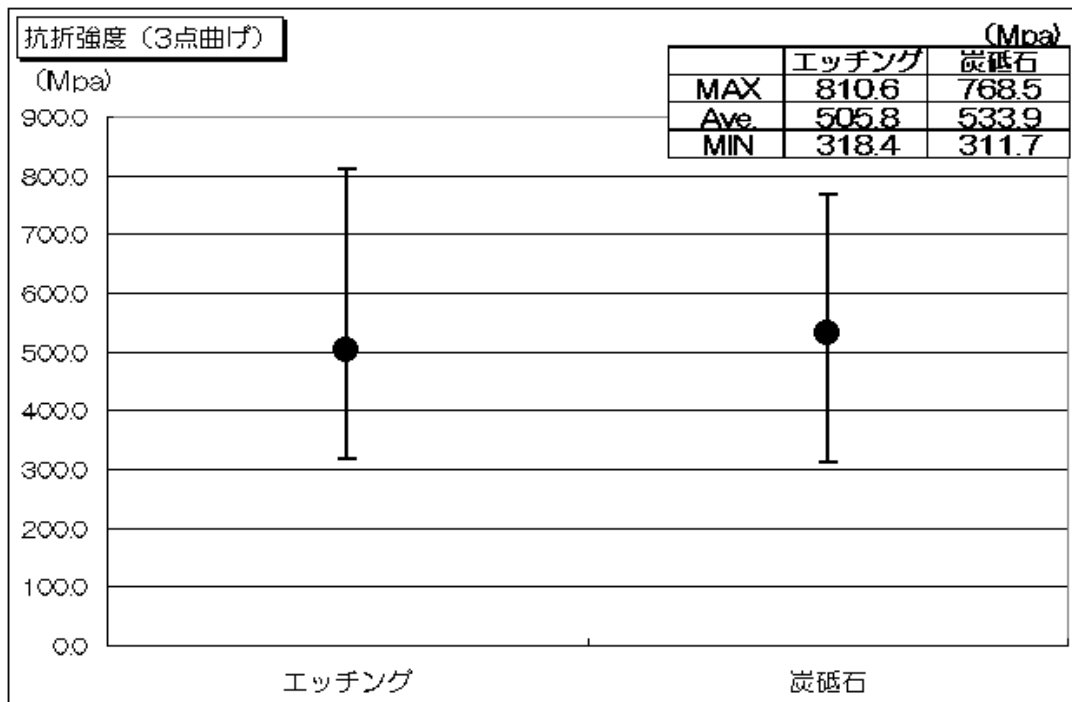


図 3 0 抗折強度比較

第5章 自動ウエハ診断装置の開発

5-1 開発装置

5-1-1 検査原理

本装置は、レーザ光散乱法により傷検出を行い、正反射光により厚さ及び表面粗さの測定を行うものである。まず傷検査方法について述べる。図3-1に示すように、投光部より試料表面上に可視光レーザを照射し、反射光を受光部で感知する。表面に異物、欠陥等がなかった場合、照射されたレーザ光は試料表面で正反射され、受光部に到達する。表面に傷等があった場合、光は乱反射をし、あらゆる方向の散乱光となる。この散乱光を受光部で感知し、傷検出を行う。次に、厚さ及び表面粗さの測定方法について述べる。図3-2に示すように、レーザ光を試料表面上に照射すると、測定面の変位により測定点が移動する。そのため反射光がセンサに入射する場所が変わり、センサ出力電圧が変化する。この原理により、厚さ及び表面粗さの測定を行う。

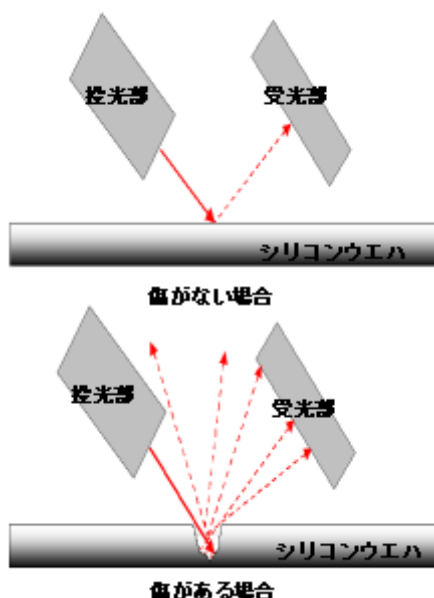


図3-1 傷検査方法

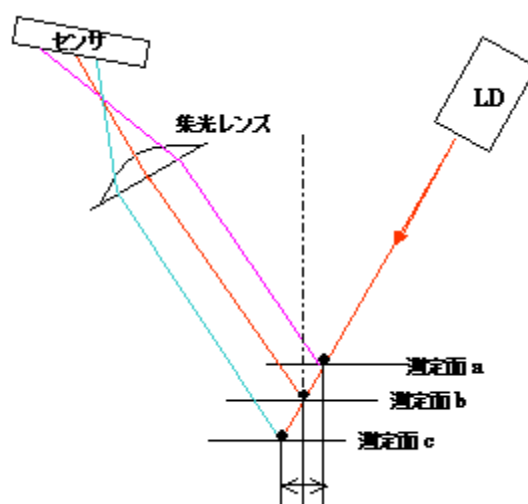


図3-2 厚さ及び表面粗さの測定方

5-1-2 装置の構成

本装置の構成を図3-3に示す。投光部から照射されたレーザ光は、ワークで散乱光、正反射光となり、受光部にて感知される。受光部からの信号は、増幅部にて増幅され、その信号を、オシロスコープにてモニタすることができる。増幅された信号は、判定部において、閾値を設けて良・不良の判定をすれば良い。判定部では判定するレベルを連続可変により調整することができる。異物や傷等が存在すると判定された場合、出力部にてLEDで点灯表示し、ブザーが鳴動する。

図3-4に投光部・受光部の構成を示す。投光部では、半導体レーザからのレーザビームが、クロックパルスに同期して高速回転しているポリゴンミラーで反射され、コリメータレンズによって平行ビームとなり、測定物の30mm範囲を走査する。受光部

では、測定物を走査した散乱光・反射光を集光レンズにより集光し、その光がフォトダイオードに到達する。投光部の光源と走査装置の仕様を表2に示す。

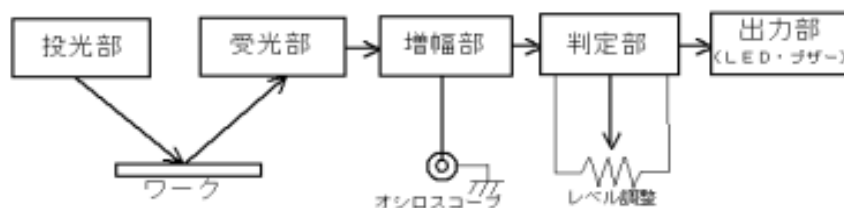


図3-3 装置の構成

表2 光源と走査装置仕様

レーザー光源	可視光半導体レーザー(1mW)
発光波長	650nm
レーザー走査回数	1600回/sec
レーザー走査速度	113m/s
最小読みとり幅	0.02μm
測定幅	30mm

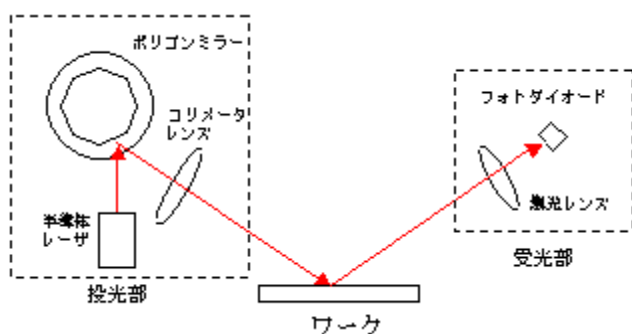


図3-4 投・受光部の構成

検査装置の外観全体を図3-5に示す。本装置を外観上大まかに分けると、装置本体、検出判定装置、検査テーブル制御装置、オシロスコープ、そしてクリーンブースから構成される。装置本体は、投光部と受光部、そしてワークを載せる検査テーブルから構成されている。検出判定装置は、増幅部、判定部、出力部の他、レーザー光源の電源等も含む。また、検査テーブル制御装置は、装置本体の検査テーブルの直線移動や回転の動作・速度を手動によって操作することができる。オシロスコープは、増幅部からの信号をモニタ・観察するために設置した。クリーンブースは、検査時に妨げとなる、塵や埃をHEPAフィルタによってできるだけ削減する目的で設置した。

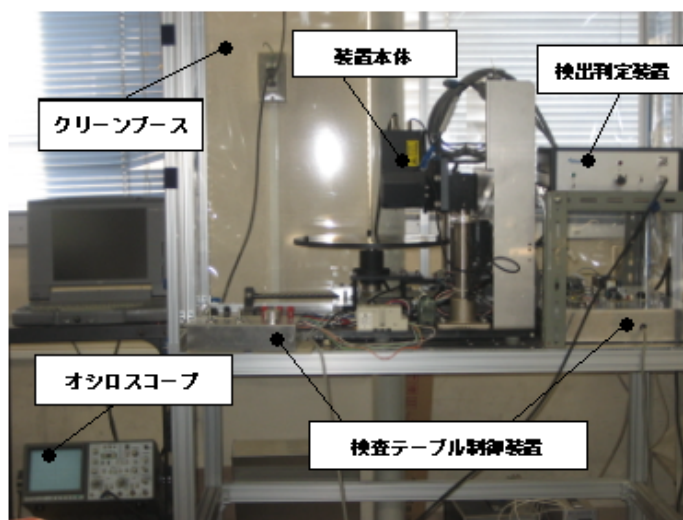


図3-5 装置全体図

図 3 6 に装置本体の投光部、受光部と検査テーブルを示す。シリコンウエハを載せたテーブルを回転させることにより、捜査範囲 30mm の円周上を検査できる。また、図 3 7 に示す通り、テーブルを直線移動させることによって、ウエハ全体を検査できるようになっている。



図 3 6 本体の検出部

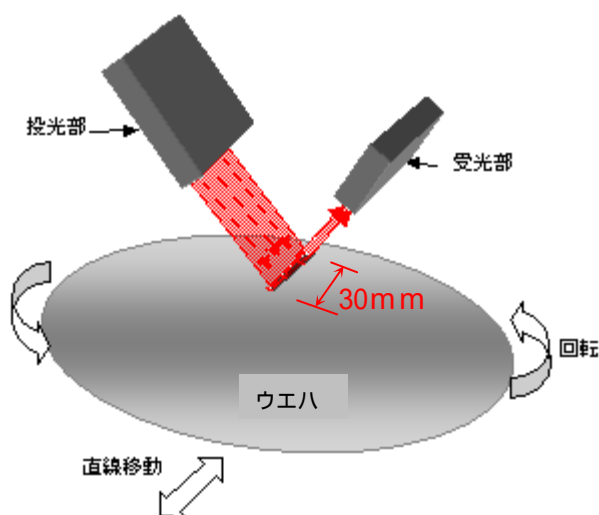


図 3 7 ウエハ検査の動き

5 - 2 ウエハ表面の傷の検出

表面欠陥のないウエハ上に、砥粒 (G C #60/80) を先端に圧着させた細い棒を用い、傷の長さを 5mm (一定) とし傷幅を $7.2\mu\text{m}$ 、 $11.5\mu\text{m}$ 、 $15.3\mu\text{m}$ 、 $20.5\mu\text{m}$ 、 $25.8\mu\text{m}$ と異なる 5 種類のサンプルを作り、その傷上を図 3 8 に示すように長手方向 (図中の矢印) にレーザ光を走査する。ただしウエハは停止。その際のセンサ出力電圧と傷平均幅との関係を表 3 及び図 3 9 に示す。

次に傷をつけたウエハを検査ステージ上に載せて検査テーブルを回転させ、しきい値

を欠陥のないウエハ表面において反応しないレベルで一定とし、検査回数 100 回のうち何回についてしきい値を越えるかを傷検出率として記録した。速さは傷部分の周速で表し、471.2mm/s、418.9mm/s、366.5mm/s、314.2mm/s、261.8mm/s、209.4mm/s、157.1mm/s、104.7mm/s、52.4mm/s まで低下させ各周速において 5 回ずつ記録を行った。

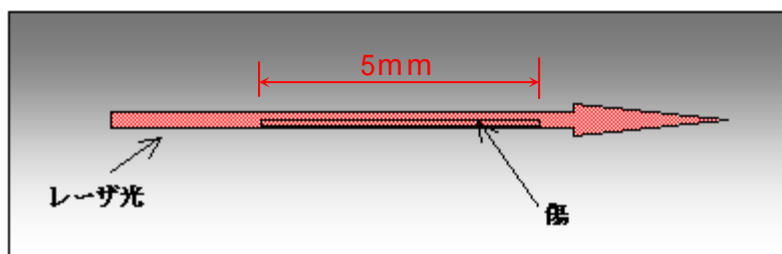


図 3 8 傷に対するレーザー光走査方向

表 3 傷平均幅とセンサ出力電圧の関係 (周速 52.4mm/s)

傷平均幅 (μm)	出力電圧 (V)					平均 (V)
	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	
7.2	1.58	1.70	1.66	1.64	1.46	1.61
115	2.12	1.98	1.86	2.02	2.08	2.01
153	3.86	3.98	3.72	3.84	3.80	3.84
206	3.98	4.16	4.02	4.08	4.12	4.07
258	6.20	6.08	6.14	5.90	6.26	6.12

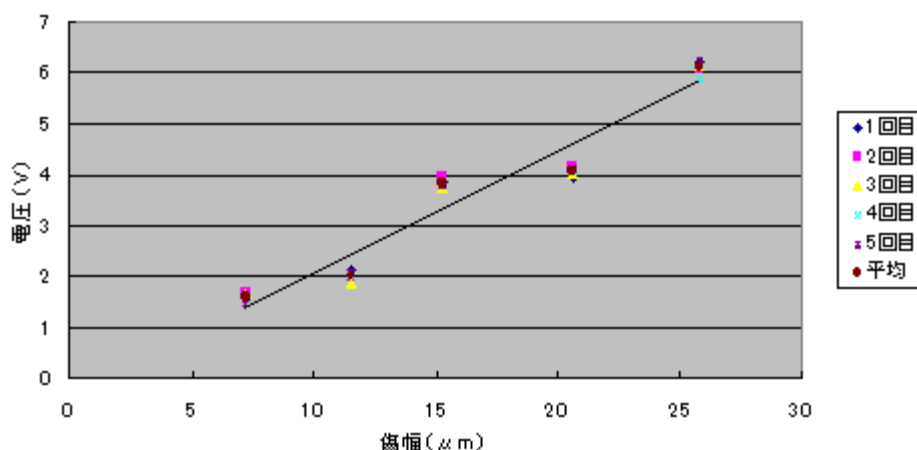


図 3 9 傷幅とセンサ出力電圧の関

図 4 0 に周速と傷検出率の関係をまとめたものを示す。傷平均幅 $15.3\mu\text{m}$ (センサ出力電圧 3.84V) の傷において周速 52.4mm/s までは、100%の傷検出率が得られた。しかし、それ以下の傷平均幅に対しては、最低周速でも 100%の検出率は得られなかった。全体的に見て周速が上がるのに伴って、傷検出率の精度が低下する傾向にあり、出力電圧が

高いほど、つまり傷平均幅が大きいほど、高速での検出が可能であるということがわかる。

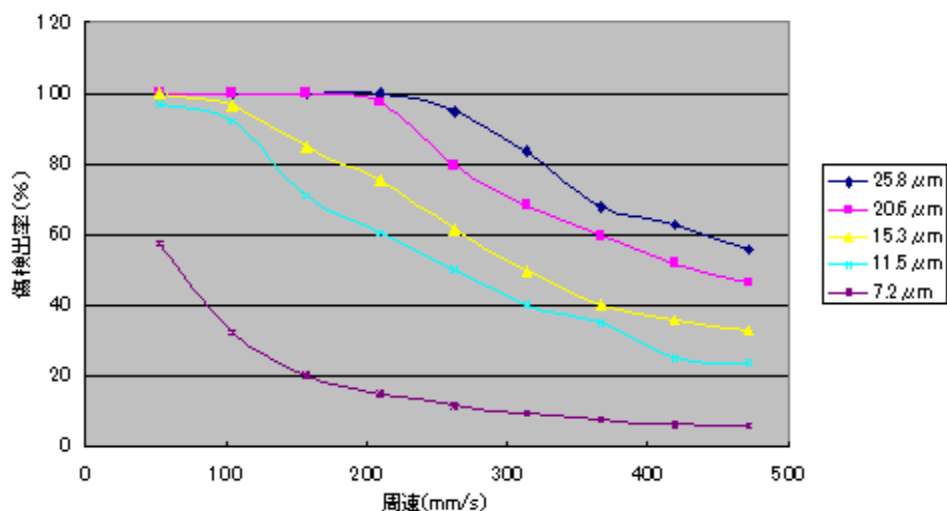


図 4 0 ウエハ回転速度と傷検出率の関係

5-3 ウエハ厚さ及び表面粗さ測定

5-3-1 ウエハ厚さの推定

半導体ウエハは厚さが薄くなると、加工が難しく、割れやすいため取扱が難しい。そこで、今回の実験では、金属に段差をつけた試験片(図41)を作成し、それを測定対象とした。一番高い面を基準とし、50 μm から 130 μm まで 10 μm ごと段差をつけた。今回の実験における厚さとはこの基準面との高さの差のことをいう。

各面上にレーザ光を走査し、その際のセンサ出力電圧をオシロスコープで計測・記録した。図42にオシロスコープから記録した波形の例を示す。このオシロスコープ波形は、試験片の面上からの正反射光を受光部で感知させ、その信号を増幅したものである。実験結果を図43、44に示す。本実験では、基準面と段差をつけた各面の高さの差を厚さとするため、基準面からの出力電圧と各段差からの出力電圧の差をその厚さの出力電圧とする。実験結果をまとめたものを図45に示す。バラツキはあるものの厚さの増加とともに出力電圧も増加傾向にあることがわかる。

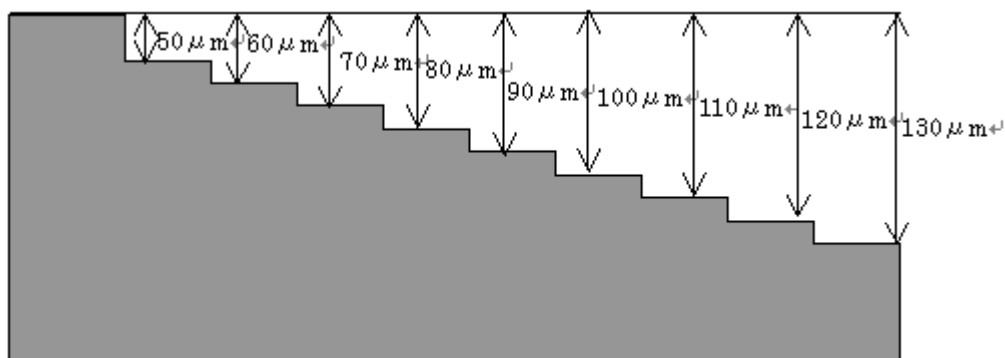


図 4 1 試験片を横から見たイメージ

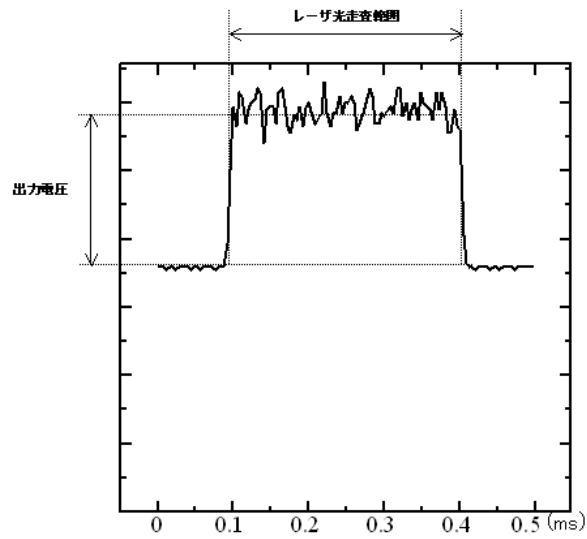


図 4 2 オシロスコープ波形の例

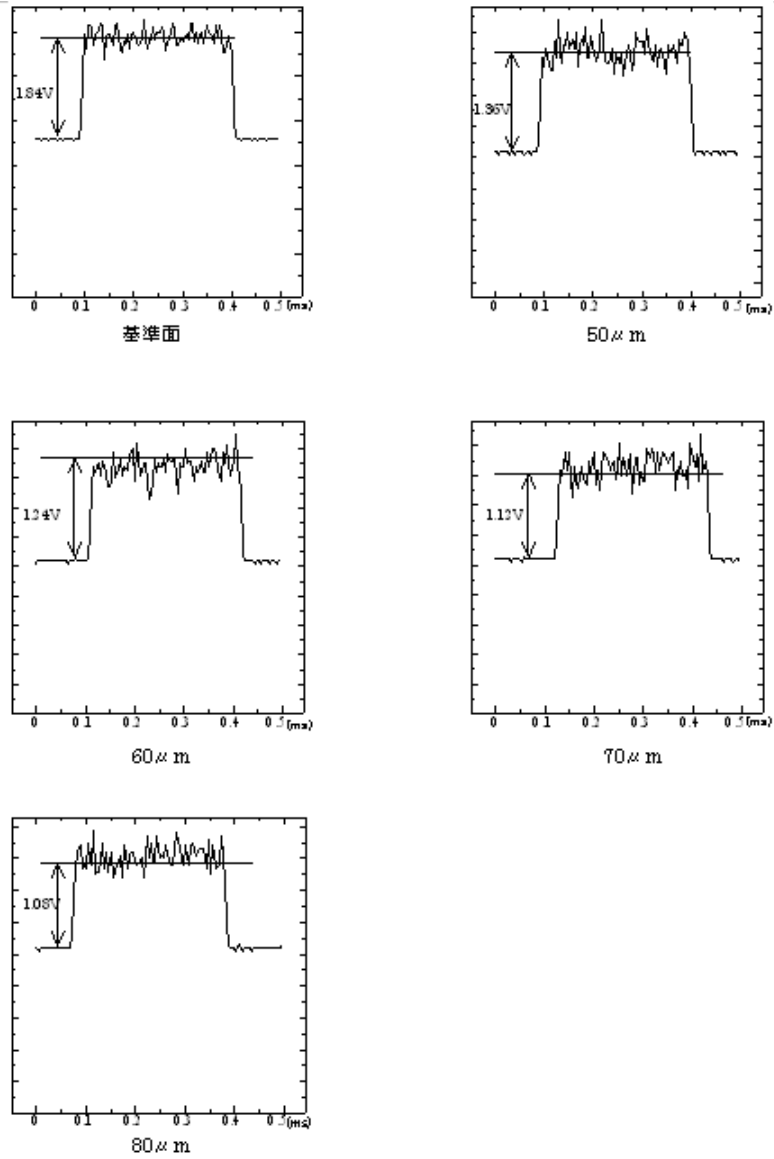


図 4 3 オシロスコープ波形 ()

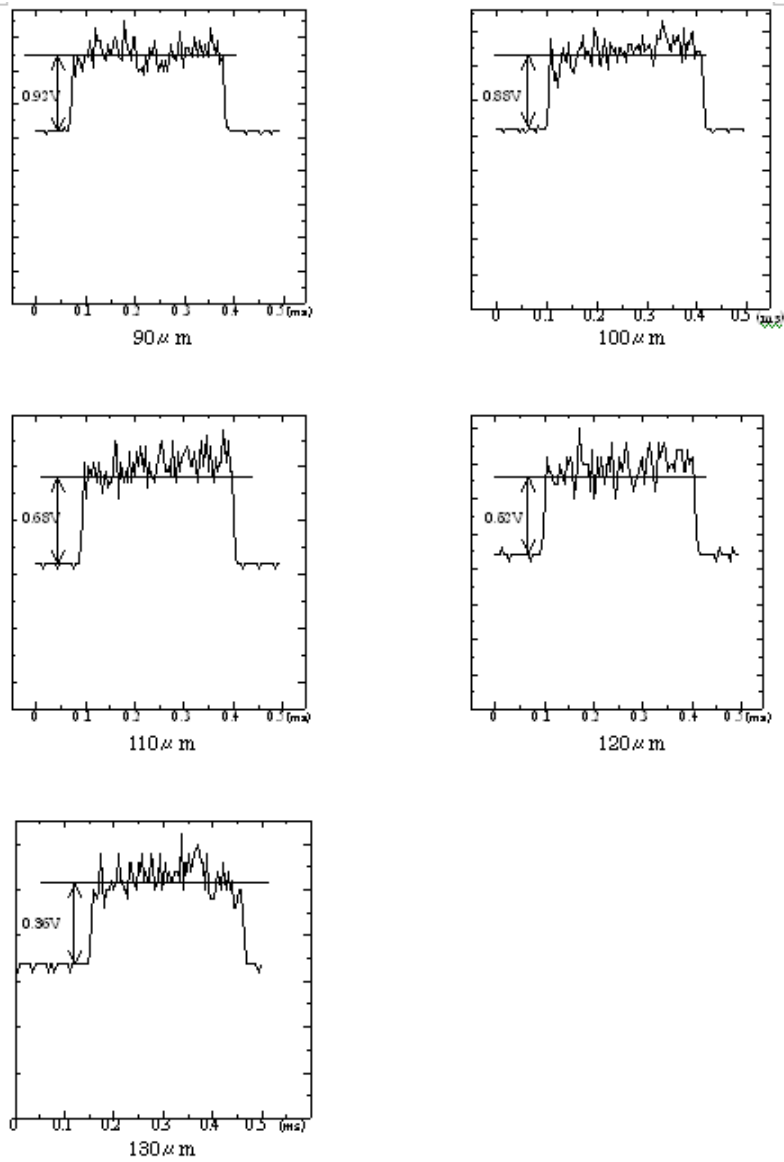


図 4.4 オシロスコープ波形 ()

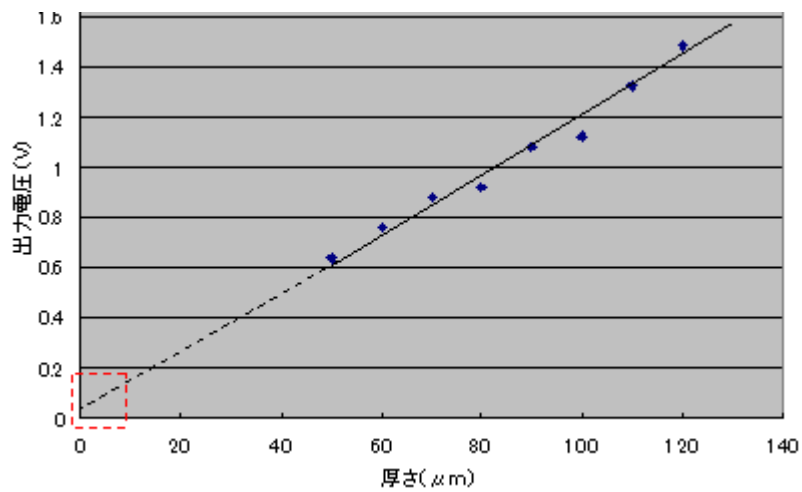


図 4.5 厚さ (段差) と出力電圧の関係

次に、厚さ（段差）と出力電圧の関係から図4-5の点線の部分の検証をするため、段差が10 μm 、5 μm 、1 μm の試験片図4-6を作成し、同様の実験を行った。実験結果を表4、図4-7に示す。この結果から、厚さ1 μm というごく微小な厚さの測定が可能であるということがわかる。

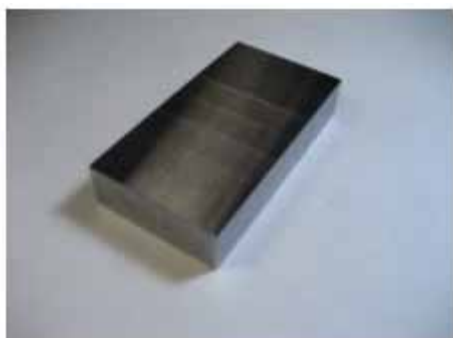


表4 厚さ（段差）と出力電圧の関係

厚さ(μm)	理論値(mV)	実測値(mV)
1	12	8
5	60	45
10	120	108

図4-6 試験片の外観（表面が段状に加工してある）

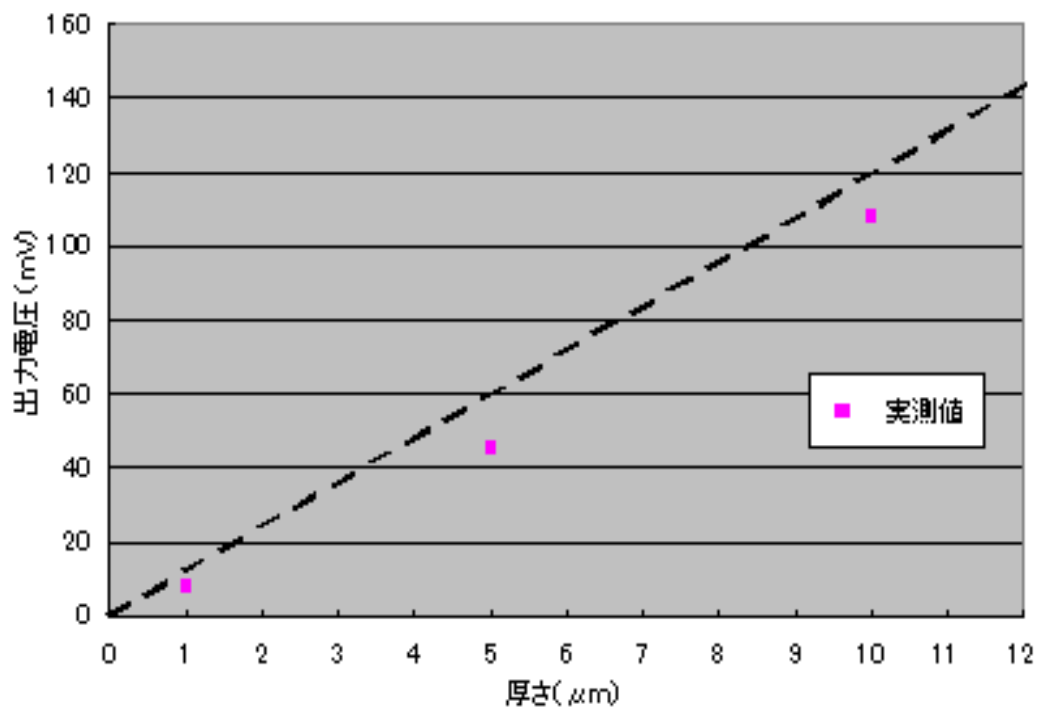


図4-7 厚さ（段差）と出力電圧の関係

5-3-2 ウエハ表面粗さの推定

次にウエハの表面粗さを調べた。(図48)

図49～53にオシロスコープから記録した波形と粗さ計から記録した波形を示す。オシロスコープの波形は、試験片からの正反射光を受光部で感知させ、その信号を増幅したものである。

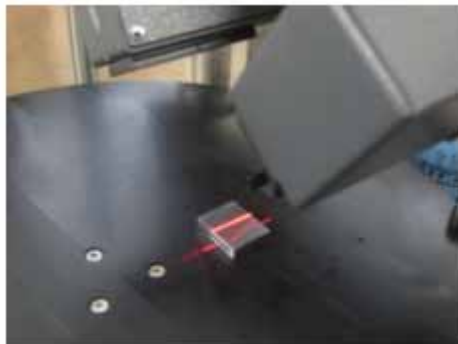


図48 表面粗さ測定の様子

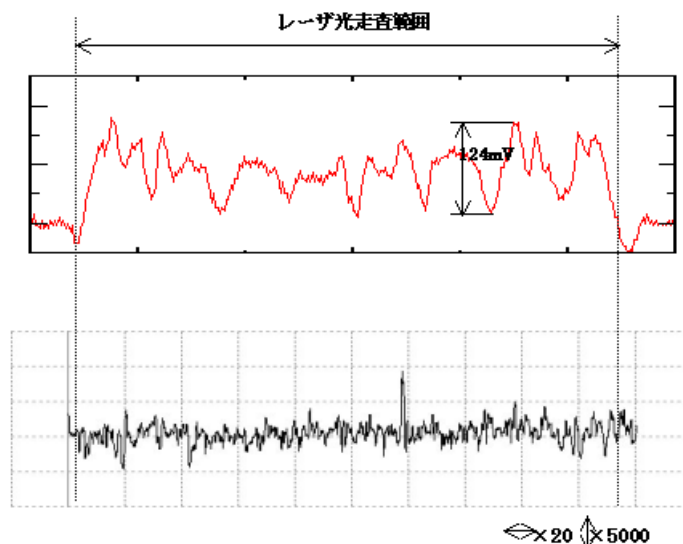


図49 Ra0.4184 μm の出力波形
(上：オシロスコープ、下：粗さ計)

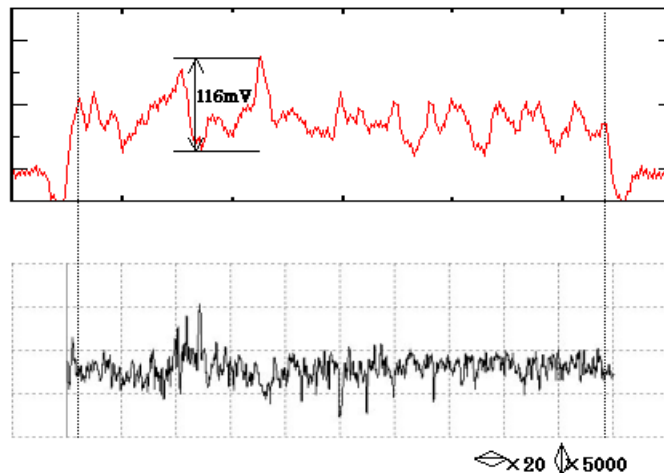


図50 Ra0.3830 μm の出力波形
(上：オシロスコープ、下：粗さ計)

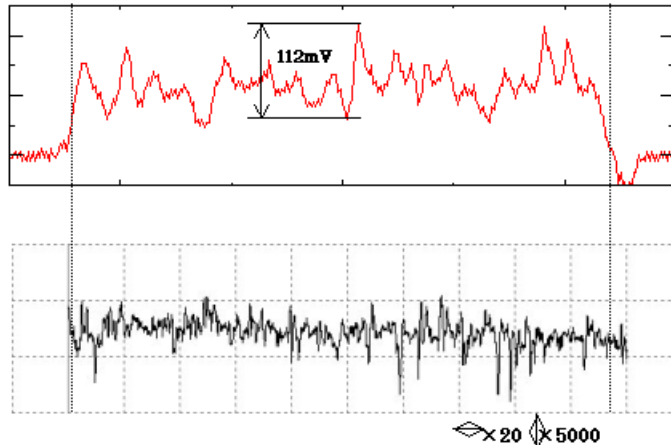


図 5 1 Ra0.3158 μm の出力波形
 (上：オシロスコープ、下：粗さ計)

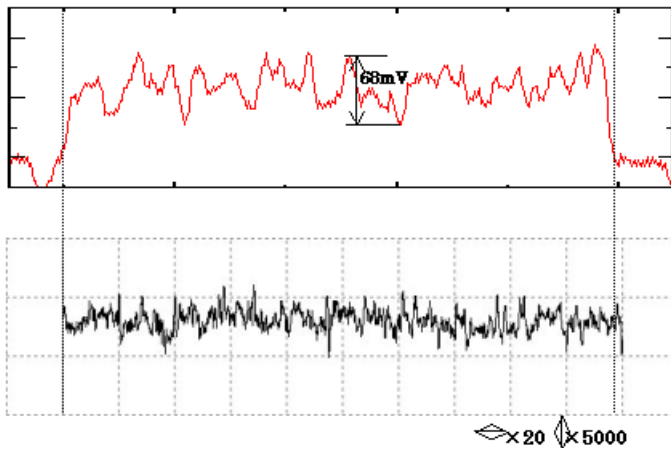


図 5 2 Ra0.2908 μm の出力波形
 (上：オシロスコープ、下：粗さ計)

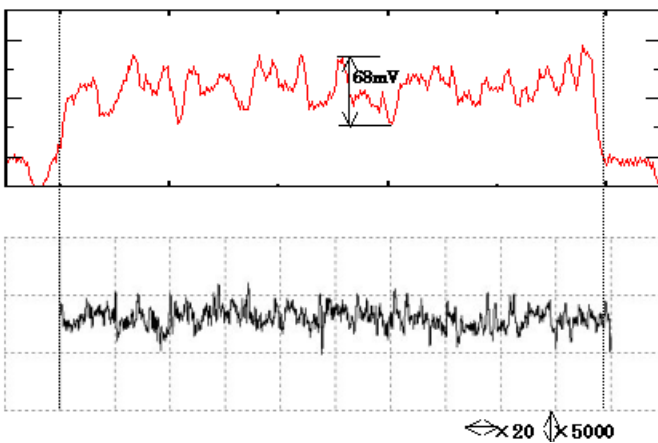


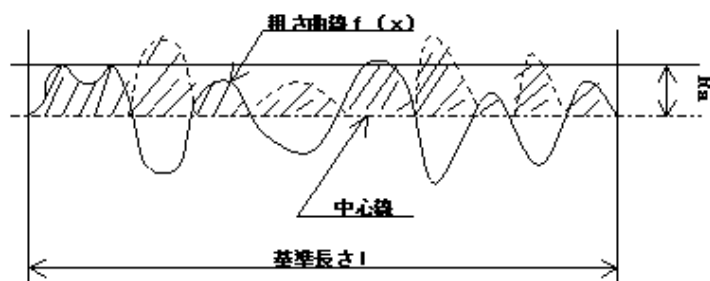
図 5 3 Ra0.2296 μm の出力波形
 (上：オシロスコープ、下：粗さ計)

ここで、オシロスコープ波形から出力電圧を算出するために、表面粗さ R_a の定義について述べる。

中心線平均粗さ R_a の定義

粗さ曲線からその中心線の方に基準長さ l の部分を抜き取り、この中心線を X 軸、縦倍率の方向を Y 軸とし、粗さ曲線を $y = f(x)$ で表したとき、次の式によって求められる値をマイクロメートル (μm) で表したものを言う。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx$$



- ・ カットオフ値
 $12.5 \mu m R_a$ 以下のとき $0.8 mm$
 $12.5 \mu m R_a$ を超え $100 \mu m R_a$ 以下のとき 2.5 とする。
- ・ 基準長さ l

原則として、カットオフ値の3倍以上の値とする。

よって、中心線平均粗さ R_a は、粗さ曲線の積分を基準長さで除した値に相当することから、得られたオシロスコープの波形から、その R_a に対する出力電圧の波形から算出することができる。

算出した値を表5に示す。また、図54に触針式表面粗さ計による表面粗さ R_a と出力電圧の関係のグラフを示す。

表5 表面粗さ R_a と出力電圧の関係

表面粗さ $R_a (\mu m)$	出力電圧 (mV)
0.2551	3.5
0.2908	3.9
0.3398	4.6
0.3830	5.0
0.4184	5.3

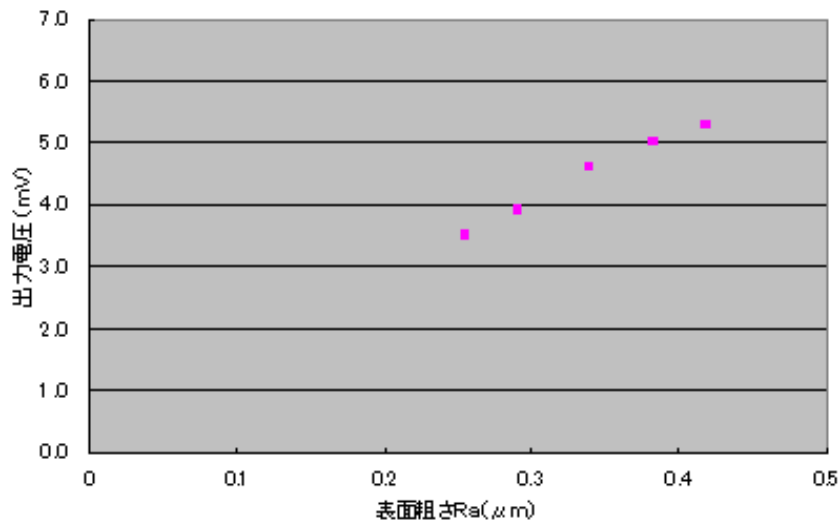


図 5.4 表面粗さ Ra と出力電圧の関係

この結果を図 5.5 中の赤い線で囲まれた部分に照らし合わせたグラフを図 5.6 に示す。

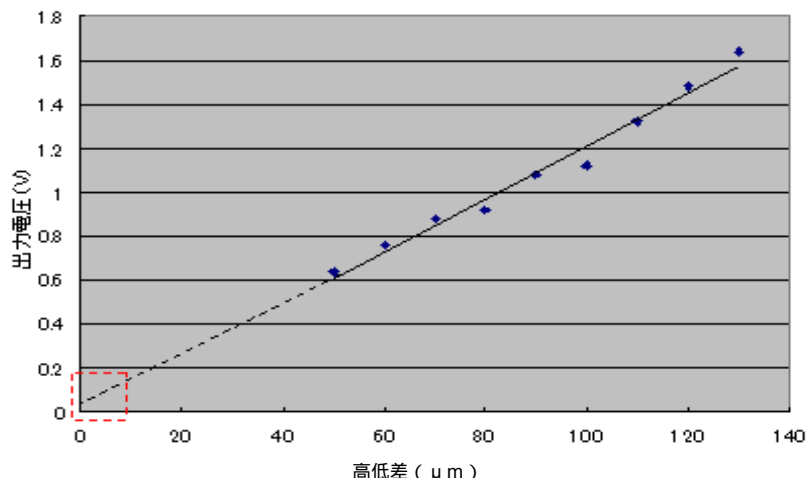


図 5.5 厚さと出力電圧の関係

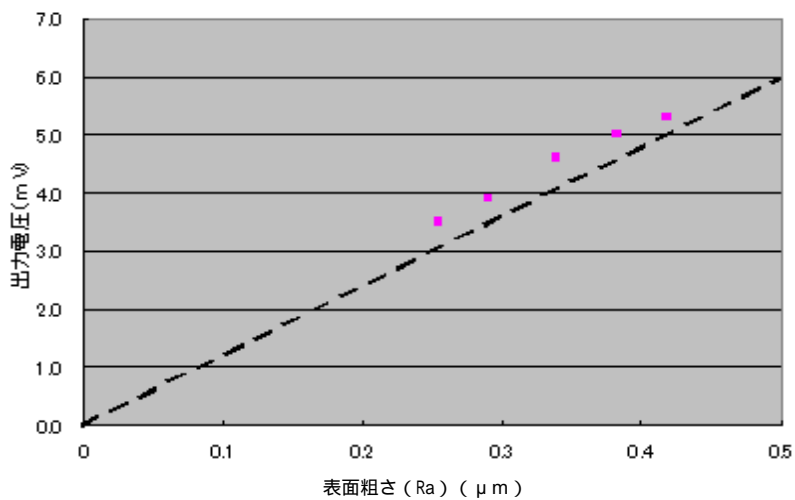


図 5.6 表面粗さ Ra と出力電圧の関係

この結果から、本装置による表面粗さ R_a の値を算出したものを表 6 に示す。粗さ計（接触式）による R_a と本装置（非接触）による R_a の値は、非常に近い値がでた。誤差はおよそ $0.02 \sim 0.04 \mu\text{m}$ である。これは、被測定物の厚さや表面状態により受光部の取り付け角を変えなければならないため生じたものと考えられる。

この結果から本装置により、触針式表面粗さ計と同等の測定が可能であることがわかる。

表 6 粗さ計による R_a と開発装置による R_a

粗さ計による $R_a(\mu\text{m})$	レーザー光による $R_a(\mu\text{m})$
0.2551	0.2917
0.2908	0.3250
0.3398	0.3833
0.3830	0.4167
0.4184	0.4417

第6章 全体総括

6-1 総合研究開発成果

今回の研究開発において得られた最大の成果は、シリコンウエハ研磨用の炭砥石が開発でき、研磨性能に極めて良好な結果が得られたことである。この開発砥石は原料全てが天然資源からなるため地球環境に優しい次世代型の技術開発である。

この成功によりウエハ研磨における 2000 番ダイヤモンド砥石 + エッチング工程が炭砥石に代替できることが可能になった。この成果は、現状のウエハ研磨加工業界に大きな進展を及ぼす。特に大幅なコスト削減が実現可能となった。さらに今後は酸化セリウムの代替研磨材としてシリコンウエハ以外の材料に対しても大いに期待が持てる。

一方、シリコンウエハ表面性状の診断装置開発では、ウエハ表面の傷等を非接触でサブミクロンレベルで判定でき、少なくとも人間の目視より高精度な測定が可能となった。開発装置はウエハ以外にも適用可能な設計でもある。

以上の結果から、川下企業の課題及びニーズであるシリコンウエハの高精度加工に基づく品質保証に対して、炭砥石を用いたシリコンウエハの低ダメージ加工と良品安定供給のための検査装置開発における研究の最終目標は達成できた。

6-2 研究開発後の課題・事業化展開

開発した炭砥石は今後、研磨加工業界で導入することを希望する。今後、適用範囲を考えると、レンズの研磨、ガラス研磨、金型研磨、ミラー（アルミ）研磨などが考えられるが今回の炭砥石は万能ではなく、ワークが異なれば砥石原料を調整する。

さらに、ウエハの傷の診断に用いた可視光レーザー乱反射を利用した方法はサブミクロンサイズの傷等の検出、表面粗さ、厚さが非接触で短時間に測定可能であり、検査装置としての実用的価値は高い。しかも低価格で販売できることを目的に開発したため、装置の需要拡大が見込まれる。ハード部はほぼ完成したので、モニタ表示でのソフト面を完成させれば、ほぼ完了となる。

事業化展開では、半導体デバイスメーカー各社やその他レンズの研磨、ガラス研磨、金型研磨、ミラー（アルミ）研磨等の応用分野などを対象に市場開拓を行う。今後、アポロ電子にて炭砥石、検査装置の製造、販売を行い、まずは国内を中心に売り込む。

炭砥石の販売先はルネサスエレクトロニクスを中心に半導体デバイスメーカー各社とし、さらなる需要獲得を目指す。その他レンズの研磨、ガラス研磨、金型研磨、ミラー（アルミ）研磨等の応用分野にも積極的に売り込む。

1年目にサンプル出荷を行い品質レベル向上の確認や試作評価、認定取得に重点を置き、2年目からは主力顧客であるルネサスエレクトロニクス甲府事業所（2011年のウエハ出荷枚数は65万枚と予測）の30%の適用を目指すとともに砥石量産のた

め設備投資を行い3年目から設備投資後量産ラインを稼働開始させ、さらに、50%の適用を目指す。

4～5年目では、実績を十分積めたところで各半導体デバイスメーカーへ売り込み。従来の砥石の置き換えを進め、国内シェア10%を目指し売上げ3億円を見込み応用分野への進出も進め6年目以降は売上げ5億円を見込む。

ウエハ自動診断装置販売は上記同様に半導体デバイスメーカー各社とし、装置の改善を進め売込み、他業種にも積極的に売り込む。

こちらも1年目にサンプル出荷を行い品質レベルの向上の確認や試作評価、認定取得に重点を置き、2年目に主力顧客であるルネサスエレクトロニクス甲府事業所に対し3～5台の適用を目指す。

3年目以降は、装置製造ラインを拡大させ、他の半導体デバイスメーカーや他の研磨業界へ売り込み、5年後には40台以上を販売し売上げ1億円超えを見込む。

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。