

ダイシングワイヤソーによる単結晶シリコンの精密切断に関する研究

鈴木孝彰^{*1*2}, 大槻俊紀^{*2}, 閻 紀旺^{*3}

Precision slicing of single-crystal silicon using a dicing wire saw

Takaaki SUZUKI, Toshinori OTSUKI and Jiwang YAN

近年, 電子機器の高性能化の要求に対して使用材料の高硬度化, 複合化, 多層化が図られており, 厚みの大きい硬脆材料の精密切断加工が求められている. 本研究では, 最大2ライン同時切断を高速で行えるダイシングワイヤソー装置を開発し, 固定砥粒ダイヤモンドワイヤを用いて, 一般のダイシング装置では加工困難な厚物の単結晶シリコンを被削材とした精密切断加工を行った. ダイヤモンドワイヤを線速750~1750m/minの1方向送りで行きさせ, 1ライン切断を実施し, 切断抵抗, ワイヤ摩耗, 被削材の表面粗さなどを実験的に調査した. その結果, 高速走行時にワイヤ走行方向に働く力が付加される現象が確認され, 切断幅の安定化および切断面粗さの向上を実現した.

Key words: precision slicing, diamond wire, dicing wire saw, single-crystal silicon, hard brittle material, fixed abrasive machining, surface roughness

1. 緒言

近年の高性能電子デバイスのために, 複合材の高硬度化や高密度化が要求されており¹⁾, 材料ロス削減, 高精度, 高品質を得るために生産プロセスの改善が必要である. 半導体産業においてはダイシングブレードが単結晶シリコンの薄化ウェーハ切断に適用されてきた. しかし, ブレード自体のたわみのため厚物ワークをダイシングブレードで高精度に切断することは困難である²⁾³⁾. 最近, 固定砥粒ダイヤモンドワイヤ用ワイヤソーがソーラー用単結晶シリコンブロックなどの寸法の大きい材料の切断に使用されてきた⁴⁾. この方法は少ないカーフロスと小さな反りを有する薄化ウェーハを得ることができる. しかし, ワイヤソーマシンは非常に大型であり, メインローラ間の距離が長く, 数千本のワイヤを巻いた重量のある大径メインローラをワイヤの必要線速に合わせて駆動させる必要があるためにワイヤ線速の限界が1000m/min程度である⁵⁾. これは

砥石での切断加工の周速度と比較して遅い. また, ワイヤの張力制御はメインローラに巻かれた供給側と回収側のローラで実施しているが, 数千本の各ワイヤごとの張力設定については課題が残されている. したがって, セラミックスと金属の異種材料で代表される電子材料で, 幅が狭く厚みの大きい硬脆材料を切断する場合には, 幅が狭い場合でもワイヤはメインローラ全体に巻くためにワイヤが消費され, 高精度を成し遂げることが困難である.

そこで, 本研究では少ないカーフロスで厚物硬脆材料の切断に適用できるダイシングワイヤソーを新たに開発した. 高精度かつ高効率を達成するため最大2ライン同時切断を可能にし, それぞれの加工部のワイヤは独立して張力制御を行い, 最高線速2000m/minを有するシステムを適用した. 固定砥粒ダイヤモンドワイヤにおいて砥石の切断加工に匹敵する高線速は望まれており, 本研究ではダイヤモンドワイヤを750から1750m/minの高速線速で一方向に走行させて, 切断現象を捉えやすくするために1ラインでの単結晶シリコン切断を実施した. そして, 線速ごとの切断抵抗, 切断後のワイヤ摩耗, 被削材の表面粗さを実験的に調べ, 明らかになった結果を報告する.

2. 実験方法

2.1 実験装置の開発

本実験では高線速対応可能な固定砥粒ワイヤ用ダイシングワイヤソーを用いて切断加工を行った. 図1(a)に実験装置

*1 慶應義塾大学大学院 理工学研究科:〒223-8522 神奈川県横浜
市港北区日吉3-14-1

Keio University

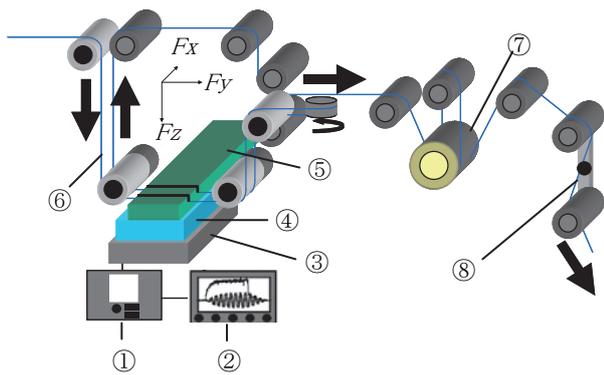
*2 株式会社:〒989-2302 宮城県亘理町逢隈牛袋字館内144-7
READ Co.Ltd.

*3 慶應義塾大学理工学部 機械工学科:〒223-8522 神奈川県横浜
市港北区日吉3-14-1
Keio University

<学会受付日:2015年 8月 21日>

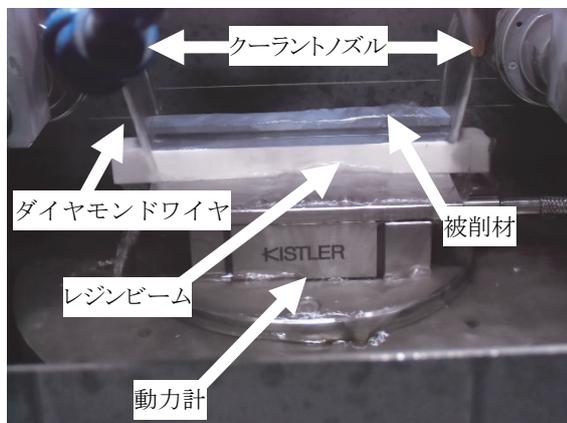
<採録決定日:2015年 11月 23日>

の概略図を示し、**図 1(b)**に単結晶シリコン切断時の加工部写真を示す。軽量かつ高精度のボビンユニットにより、装置は加速時間、減速時間を短くでき、張力制御と高線速制御の安定化が図られている。張力装置は線対称をなす 1 対のテンションアーム⑧が基端を中心に回転可能に設けられ、テンションアーム⑧の回転角度に応じた弾性力を特殊なダンサー⑦によって付勢し、回転角度を検出している。張力の変動応答性を良くするためにプログラムソフトによって張力の設定値を一定に保つようにフィードバックする機構が設定されている。この機構は切断される 2 ラインごとに独立して制御されている。断線限界の設定値以上の高張力に到達しそうになる場合、ワーク送り速度を制御し設定値以下になるようなシステムを保有しているため、高線速でも断線せずに細いワイヤ⑥を用いて切断することができる。さらに、本装置はワークの幅に応じてガイドプリー間距離を調整でき、ワークが上昇するアップカット方式を採用し、上方の CCD カメラと回転テーブルを装備することでワークのアライメントをスムーズに行うことが可能である。また、回転テーブルはワイヤ⑥に対して被削材表面を 5° まで傾けることができ、加工開始時および終了時にワイヤがワークに接触する長さを短くすることで食い込み安定性向上を図っている。



①アンプ ②記録計 ③動力計 ④レジンビーム
⑤被削材 ⑥ワイヤ ⑦ダンサー ⑧テンションアーム

(a) 模式図



(b) 加工部写真

図 1 実験装置の概略

2.2 切断条件

表 1に切断実験の主要条件を示す。Ni 電着ダイヤモンドワイヤを使用し、ダイヤモンドワイヤの線径は約 97 μm で粒径は 6~12 μm である。被削材は一定の形状(幅 125mm×高さ 10mm×長さ 13mm)の p 型単結晶シリコンとし、クーラントは市水を使用した。この実験は異なる 5 条件の線速で各条件 15 切断を実施した。各切断条件で 1 切断当りのワイヤの使用量を 4000m とした。ダイヤモンドワイヤは供給側から使用済み側のスプールに 1 方向に走行させ、切断後に使用済みから供給側に巻戻し、同じワイヤを再利用して行った。

2.3 測定方法

切断幅の測定は測定顕微鏡 MM-800(ニコン製)を用いて、被削材のワイヤ入口側と出口側で実施した。切断抵抗は TYPE9256C(キスラー製)の 3 分力計により軸方向、接線方向、垂直方向を測定し、アンプを介して記録した。ダイヤモンドワイヤの表面は走査電子顕微鏡(SEM) VK-7800(キーエンス製)で 500 から 5000 倍で観察した。切断後のワークの平均表面粗さはレーザ顕微鏡 VK-9710(キーエンス製)により測定した。**図 2**は測定点を中心に粗さ曲線の基準長さ 0.8mm で 3 点測定し、粗さの平均値を求めた。

表 1 切断実験条件

| | |
|---------|----------------------------------|
| 被削材 | P 型単結晶シリコン |
| ワーク形状 | 幅 125mm×高さ 10mm×長さ 13mm |
| 線速 | 750, 1000, 1250, 1500, 1750m/min |
| 張力 | 11.76N(1.2kgf) |
| ワーク送り速度 | 12mm/min |
| 切込深さ | 16.2mm(レジンビーム切込み量 6.2mm) |
| 使用ワイヤ長さ | 4000m |

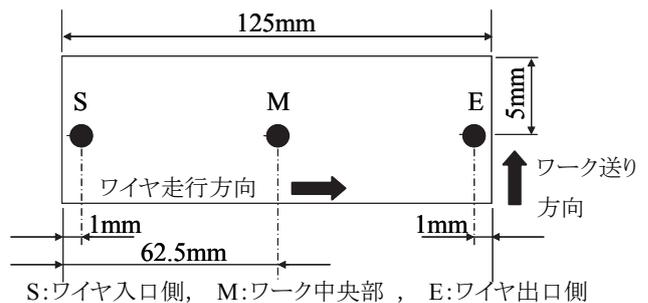


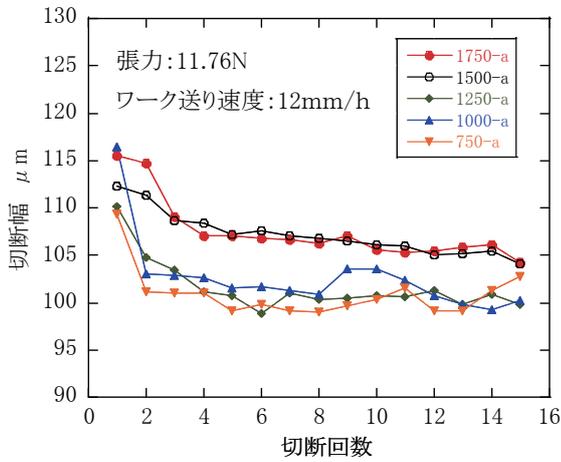
図 2 表面粗さ測定点

3. 結果と考察

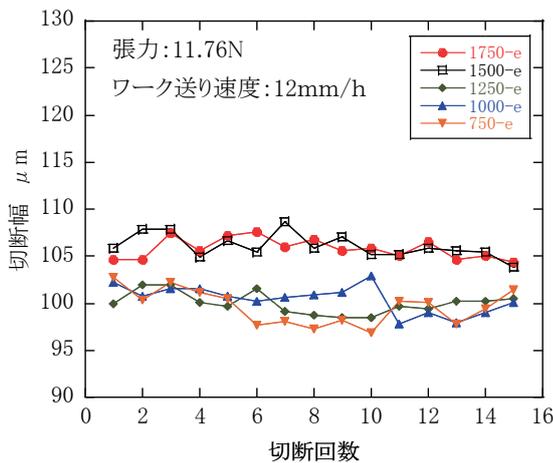
3.1 切断幅

図 3に被削材の上面から見た切断幅の結果を示す。同図(a)はワークのワイヤ入口側、同図(b)はワークのワイヤ出口側の切断幅を示している。切断幅はダイヤモンドワイヤの摩耗のために初期段階でわずかに大きい。3 ライン切断後に線速 1750m/min では切断幅のばらつきは 5 μm 以下に抑えられている。**図 4**に線速 5 条件で 15 切断加工後の各ワイヤ 4000m

における200mごとのワイヤ線径の平均値を示す。ワイヤ線径は95~97 μm で、全長にわたり安定しており、線速による変化は確認されない。しかしながら、切断幅は高線速で相対的に大きくなっている。これは高線速で誘発されるワイヤ振動の影響によるものと考えられる⁶⁾⁷⁾。



(a) ワイヤ入口側



(b) ワイヤ出口側

図3 シリコン切断後の切断幅

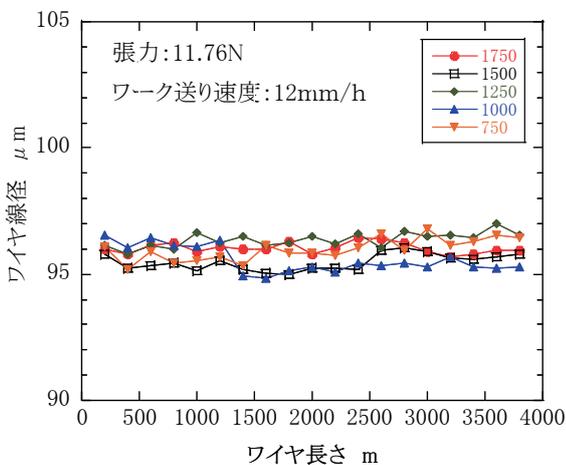
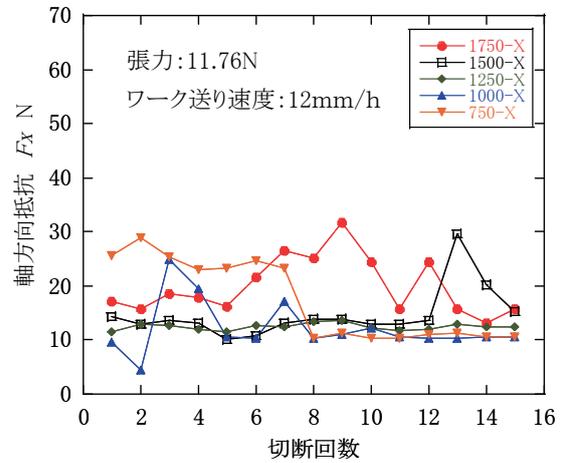


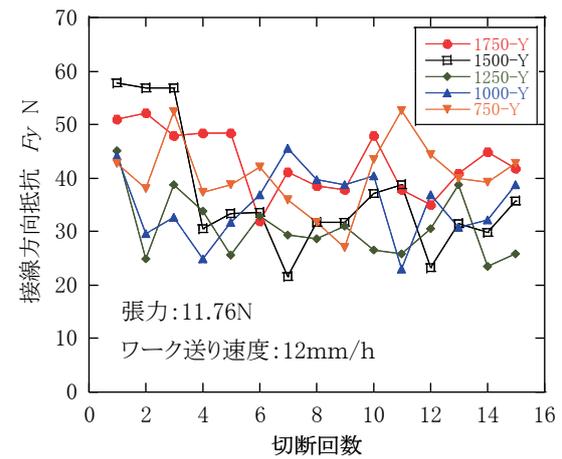
図4 15回切断後の使用済みワイヤ平均線径

3.2 切断抵抗

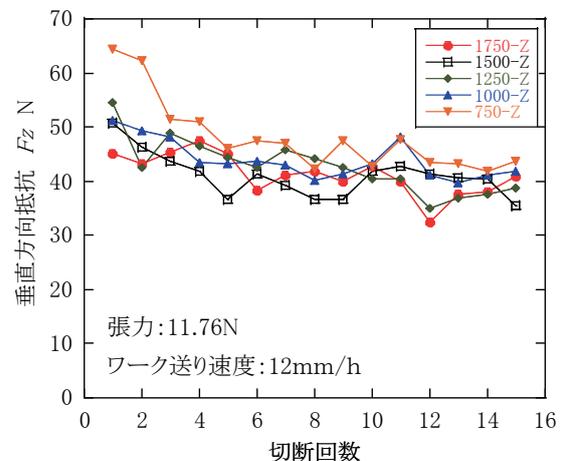
図1(a)に示すように軸方向、接線方向、垂直方向の荷重をそれぞれ F_x , F_y , F_z とする。図5に F_x , F_y , F_z の切断回数における変化を示す。切断回数でばらつきが見られるが、ワイヤの偏摩耗や短時間中のクーラントの不均一な流れの影響と推察される。 F_z は線速にかかわらず、切断回数の増加につれて



(a) 軸方向抵抗 F_x の切断回数に対する変化



(b) 接線方向抵抗 F_y の切断回数に対する変化



(c) 垂直方向抵抗 F_z の切断回数に対する変化

図5 切断抵抗の切断回数に対する変化

減少している。この力の減少は、ワイヤ上のダイヤモンド粒子を覆っているNiメッキが剥がれたため切断幅が減少し、砥粒の先端が露出することで砥粒が加工に有効に作用したものと考えられる。 F_x が他の2つの力と比較すると明らかに小さく、 F_z が F_y よりわずかに大きい結果は被削材側により大きな力が働き、ワイヤがたわみを有しながら切断加工が行われていたことを表している。また、 F_y の変動は張力を一定値に保つよう加工中に制御するため、ワイヤがたわむときに弾性変形で生じるワイヤの伸びを張力で瞬間的に制御するので、他の2つの力より変動が大きいと考えられる。図6に750から1750m/minまでの2分力比 F_y/F_z のプロット図を示す。2分力比は線速が遅い場合は1以下であり、ワークを押付ける荷重がワイヤ接線方向の荷重より大きいことを示し、最高速1750m/minではほぼ1に至った。図7は切断張力と切断時のワイヤのたわみ角度を模式的に示したものであり⁸⁾、この関係は(1)と(2)の式によって表すことができる。

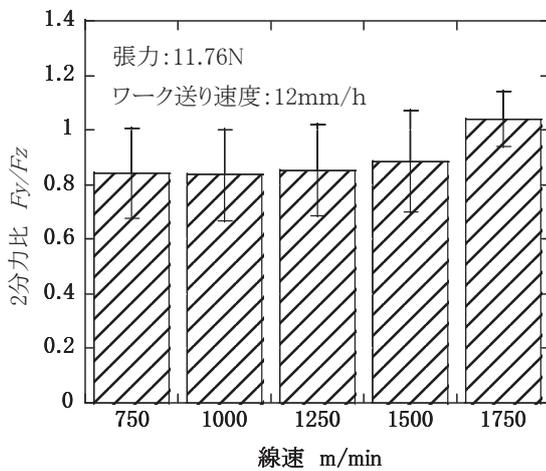
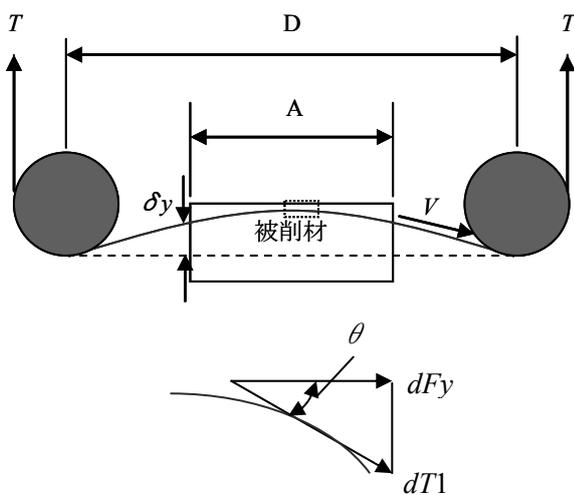


図6 線速と2分力比(F_y/F_z)の関係



被削材中の破線部拡大図

図7 切断時のワイヤ張力とたわみの模式図

ここで $dT1$ は微小時間の張力、 dFy は微小時間の接線方向の力、 θ はその位置でのたわみ角度、 $T+dT1$ は見かけ張力を示す。

$$dFy/dT1 = \cos \theta \tag{1}$$

$$\therefore T + dT1 = T + dFy/\cos \theta \tag{2}$$

図6の結果はワイヤ線速の増加によって dFy がワイヤの走行方向に付加され、 F_y/F_z の増加をもたらすことを表している。この傾向は、ワイヤを走行するために余分な力が必要であることを示している。本装置において F_y に相当する張力を指定値の11.76Nになるように制御するために余分な力(見かけ張力)が生じると考えられる。図3の結果のようにワイヤがより高速走行する場合は振動の影響によって、さらに見かけ張力が付加されていると考えられる^{9) 10)}。さらに、式(1)のとおり、 dFy が増加すると仮定すると $\cos \theta$ が増加し、たわみ角度 θ が減少する。クーラントはワイヤ走行時にワイヤを伝いながら加工点に進入するため、ワイヤたわみ角度が減少すると、クーラントが被削材に進入しやすくクーラントの供給が円滑になり、シリコン切屑の排出特性が改善されるのであろう¹¹⁾。 F_z がワイヤ線速でほとんど変化しないことは、これが理由であると考えられる。

3.3 ダイヤモンドワイヤの表面形態

使用済みワイヤ長さ1600m地点における各ワイヤ線速でのSEM写真を図8に示す。切断後、ダイヤモンド粒子の3つの形態がワイヤ上に観察された。第1の形態は切断時に被削材に有効に作用した鋭く露出したダイヤモンド粒子である。拡大図Bで示すように、効果的なダイヤモンド粒子はNiめっきから露出している^{12) 13)}。第2の形態はほとんどダイヤモンドの露出がない非作用のダイヤモンド粒子であり、第3の形態は脱粒したダイヤモンド粒子である¹⁴⁾。図9に各ワイヤ線速でダイヤモンド粒子のそれぞれの形態比率を示す。高線速では作用するダイヤモンド粒子の減少が確認された。ダイヤモンドワイヤでの切断を考えた場合、単位時間当たりの切断面積 S は式(3)で表される。ここで、 D_w は切断幅を V は線速を示す¹⁵⁾。

$$S = \pi/2 \cdot D_w \cdot V \tag{3}$$

さらに、切込み深さを d 、被削材の幅を A 、切断時間を t 、時間 t の間に切断される距離を切断距離 δL とすると切断除去量は次式のように表される。

$$S \cdot d = D_w \cdot A \cdot \delta L/t \tag{4}$$

$$\therefore d = 2A\delta L/\pi Vt \tag{5}$$

(3)~(5)式の分析から、切込み深さは線速に反比例することがわかる。ダイヤモンドを覆っているNiめっきは、切断中に被削材と接触することによって除去されるであろう。より高線速で

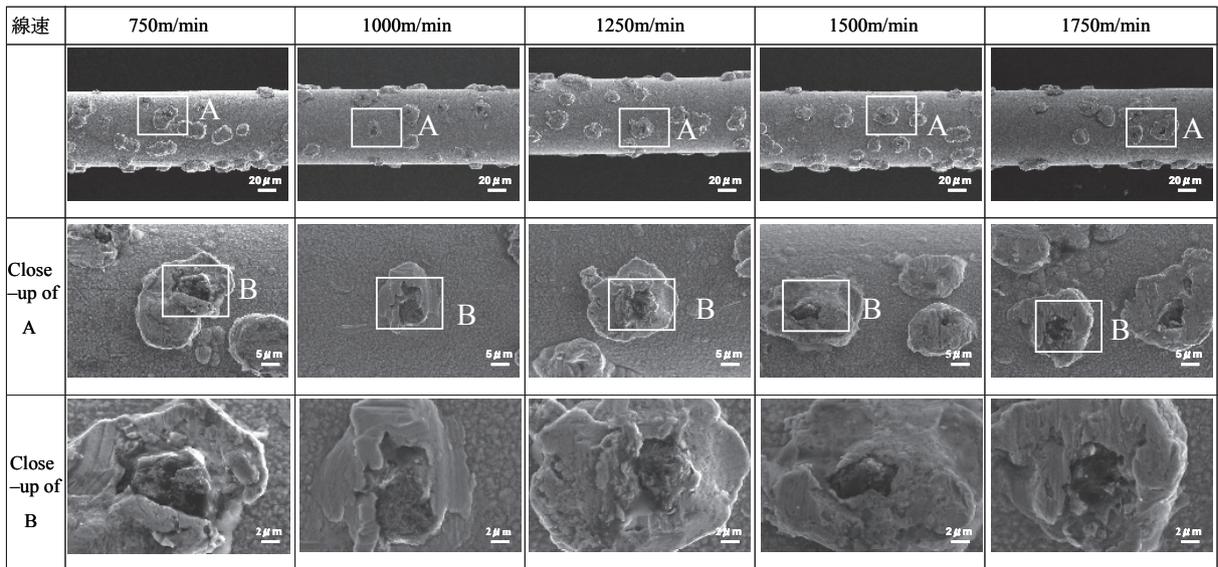


図8 使用後のワイヤ SEM 写真

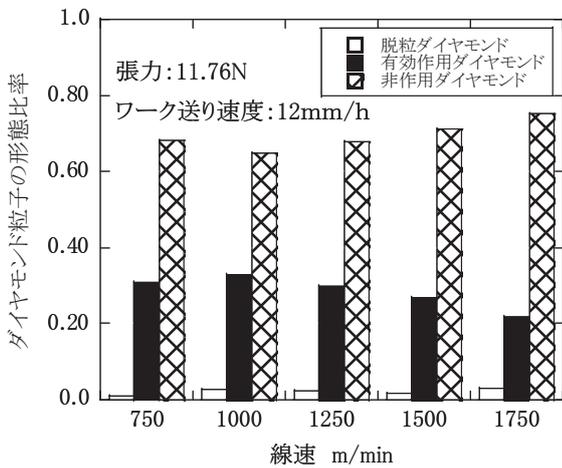
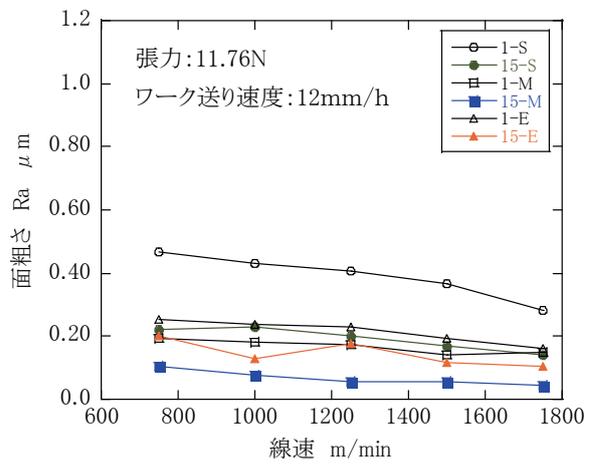


図9 線速ごとのダイヤモンド粒子の形態比率

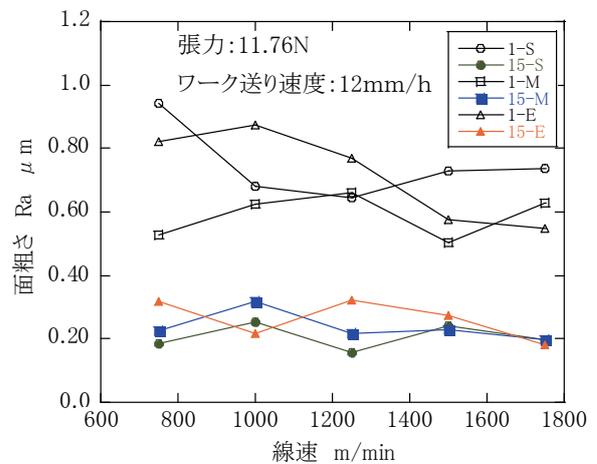


(a) ワイヤ走行方向の面粗さ

切込み深さが小さくなるので、Ni めっきの除去が困難になり、露出したダイヤモンド粒子が漸減する結果を示している。また、図のダイヤモンド粒子周辺の Ni めっき表面には各線速条件によらず、ワイヤ走行方向だけでなく円周方向にも微細な除去痕が確認された。ワイヤは切断後に供給側へ巻戻し、同じ部分を再利用するときにワイヤがねじられ、ガイドプリーなどによってこすられたためと考えられる。

3.4 表面粗さ

図10(a)に1回切断後、15回切断後の被削材におけるS(ワイヤ入口側), M(ワーク中央部), E(ワイヤ出口側)点でのワイヤ走行方向の表面粗さ Ra の変化を示す。ワイヤ線速が増加すると表面粗さは向上する。1回切断後のワイヤ入口側の表面粗さ Ra は 0.46 μm から 0.28 μm に向上した。線速 1750m/min, 15回切断後の表面粗さ Ra は 0.20 μm 以下の良好な加工面が得られた。また、1回切断後のワークの入口側の表面粗さはワークの中央部や出口側と比較して相対的に大きい。今回の実験では、1方向にワイヤを走行させているた



(b) ワーク送り方向の面粗さ

図10 線速と面粗さの関係

めワークの入口側でのみダイヤモンドを覆う Ni めっきが被削材によって除去されており、切断回数の増加に伴いダイヤモンドが有効に作用していると推察される。図 10(b)にワーク送り方向の表面粗さの変化を示す。線速の違いによる明確な差は確認されなかった。一方、1 回切断後と 15 回切断後では大きく異なり、15 回切断後は Ra0.2 μ m 程度になり、ワイヤ走行方向の面粗さに近づき向上している。この結果はワイヤを 1 方向に送線後、供給側に戻して再度加工を実施しているため、加工回数増加によるワイヤ上のダイヤモンド粒子の摩耗によ

り、ワイヤからの各砥粒の突出し高さのばらつきが小さくなったためであると推定される。

図 11 は各線速で切断した被削材のレーザ顕微鏡による測定結果であり、ワイヤ線速 750 と 1750m/min の 1 回切断後と 15 回切断後の被削材表面を示す。各結果でワイヤ走行方向にソーマークが確認され、図中の青い点は観察されたシリコン表面の微小くぼみを示している¹⁶⁾。微小くぼみの存在位置は特定の位置によらず、ランダムに見られる。

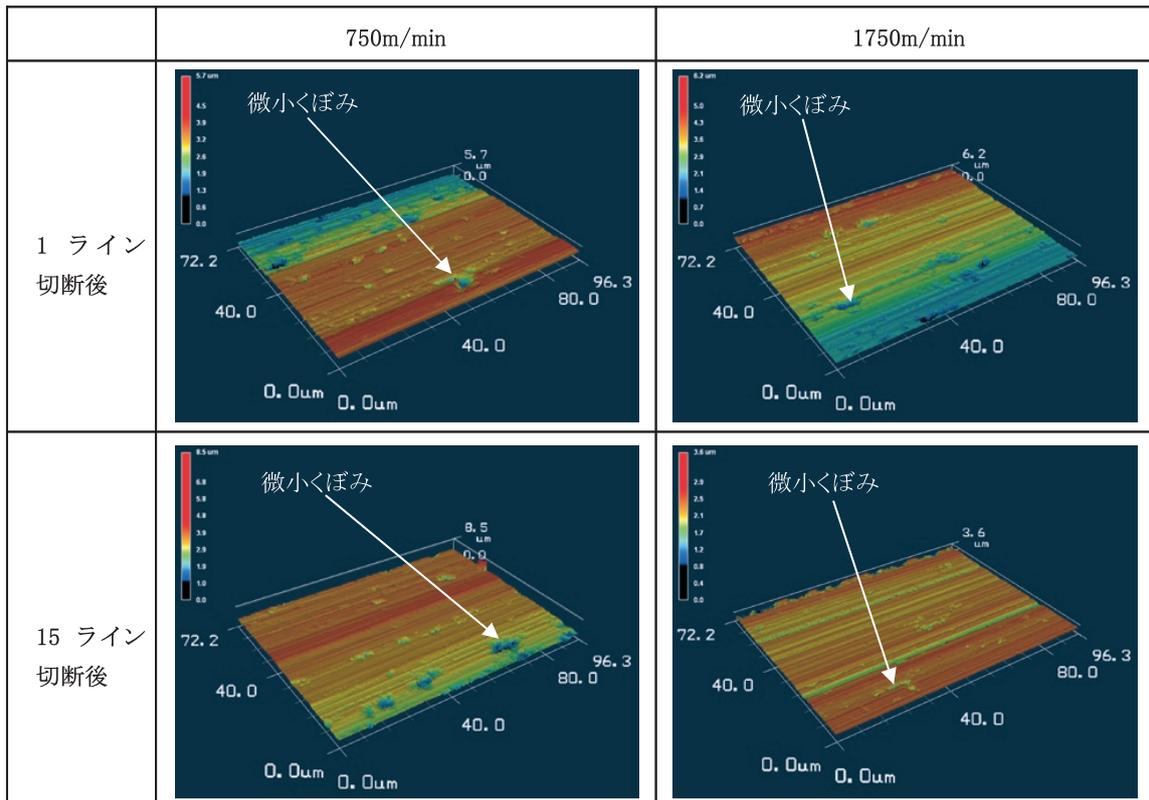


図 11 切断後の被削材表面のレーザ顕微鏡による測定結果

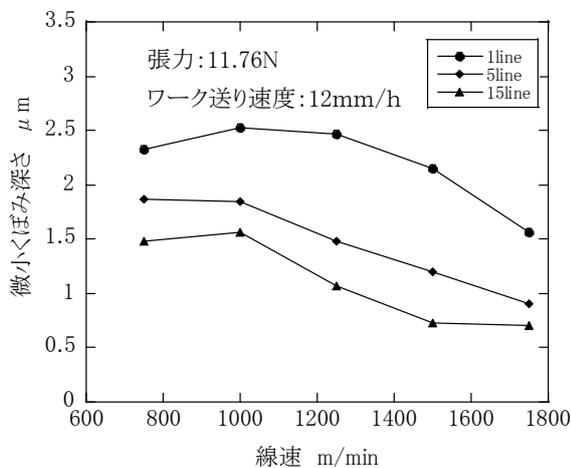


図 12 線速および切断回数による微小くぼみ深さの変化

図 12 に 1, 5, 15 回切断後のシリコン表面の微小くぼみ深さを示す。高線速かつ切断回数が増えるほど微小くぼみ深さは小さくなり、線速 1750m/min では線速 750m/min と比較し、約 1/2 に低減した。この結果は、ワイヤ走行方向の表面粗さ結果と類似しており、一旦ダイヤモンド粒子の Ni めっきが除去されると、露出したダイヤモンド粒子は効率的に作用し、高線速では切込み深さが小さくなるため、微小くぼみ深さが小さくなったと考えられる。この微小くぼみは、加工中に脆性材料である単結晶シリコンに微小破壊(クラック)が生じ、それが加工面に残留した結果である¹⁷⁾。一般に、砥粒 1 個当りの切取り厚さが大きければ大きいほど脆性破壊が発生しやすく、微小くぼみが多く発生する。本研究では、切込み深さ方向(z 方向)の送り速度を一定とする場合、高線速を用いることによって砥粒 1 個当りの切取り厚さが減少し、加工中の脆性破壊が抑制され、延性モード加工に遷移することになる。その結果、微小くぼみ

の発生も抑えられたと考えられる。今回の実験結果から、高線速で表面品質改善が期待できることを示している。

4. 結言

新しく開発されたダイヤモンドワイヤ用ダイシングワイヤソーシステムを用いて単結晶シリコンの線速ごとの精密切断試験を実施した結果、以下の結論を得た。

- 1) 線速 1750m/min では切断回数増加にともない切断幅が安定し、ばらつき 5 μ m 以下を達成した。
- 2) 線速 1750m/min での切断抵抗 2 分力比は 1 に近づき、ワイヤの振動を抑制するためにワイヤ走行方向の見かけ張力付加現象が確認された。
- 3) 高線速では Ni めっきから露出した有効作用ダイヤモンド粒子の比率が相対的に減少することが確認された。
- 4) 高線速では切断回数の増加にともない表面粗さが向上し、微小くぼみ深さが低減することが明らかになった。

5. 参考文献

- 1) M.Nagano, N.Mukae, and Y.Mori: The Development and Practical Applications of High Hardness High Toughness Si₃N₄ Ceramics, J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy., 57, 8 (2010) 553 (in Japanese).
- 2) K.Syoji: Precision Cut-off Grinding with an Outer Blade Saw, Japan society for Precision Engineering., 60, 2 (1994) 168 (in Japanese).
- 3) Y.Zhang, Y.Tani, et al: Improvement of Cutting Performance of Electroplated Blade Reinforces by Metal Films, Japan society for Precision Engineering Autumn Meeting., (2011) 107 (in Japanese).
- 4) H.Oishi, K.Asakawa, et al: Effects of Wire running Speed and Work Feed Rate on Multiwire Saw Slicing –Study on 400mm-Diameter Silicon Ingot Slicing (2nd Report)-, Japan society for Precision Engineering., 67 (2001) 791 (in Japanese).
- 5) A.Tanizaki, et al: Cutting Characteristic of the CFRP by Wire Saw, Japan society for Precision Engineering Spring Meeting., (2014) 1015(in Japanese).
- 6) M.Mizuno, et al: 2-Dimensional Measurement of the Transverse Motion of a Saw-Wire, Japan society for Precision Engineering Spring Meeting., (2005) 9-10 (in Japanese).
- 7) M.Mizuno, et al: Study on Oscillation Characteristic of Saw-Wire, Japan society for Precision Engineering Autumn Meeting., (2005) 1063 (in Japanese).
- 8) S.Ito, R.Murata: Study on Cutting-off Process with Diamond Abrasive Wire (1st Report) –Fundamentals of Constant Pressure Cutting-off Process-, Japan society for Precision Engineering., 54 (1988) 101 (in Japanese).
- 9) M.Mizuno, et al: The effects of the wire tension and distance between guide rollers on the wire transverse motion, Japan society for Precision Engineering Spring Meeting., (2006) 597 (in Japanese).
- 10) K.Yotsuda, H.Suwabe, and K.Ishikawa: Effect of grain size of slurry on multi-wire saw, Japan society for Precision Engineering Autumn Meeting., (2013) 203 (in Japanese).
- 11) L.Jin, F.Wang, and L.Zhao: Ping-Pong Fixed Abrasive Diamond Wire Saw Slicing Piezoelectric Crystal Quartz, Materials Physics and Mechanics., 21 (2014) 168.
- 12) K.Ishikawa, H.Suwabe, et al: Study on Slicing Characteristics by Wire Tool Electrodeposited Coating Diamond Grain, Japan society for Precision Engineering Spring Meeting., (2005) 3 (in Japanese).
- 13) Craig W.Hardin, Jun Qu, and Albert J.Shih: Fixed Abrasive Diamond Wire Saw Slicing of Single-Crystal Silicon Carbide Wafers, Materials and Manufacturing Processes., 19 (2004) 355.
- 14) K.Ishikawa, H.Suwabe, et al: Study on Machining Characteristics of Wire Tool with Electrodeposited Diamond Grains, Japan society of Mechanical Engineers., Series (C), 60, 573 (1994) 329 (in Japanese).
- 15) S.Sakamoto, Y.Kondo, et al: Study on Slicing Mechanism of Multi-Wire Saw - Derivation of Fundamental Evaluation Function and the Utility, Japan society for Precision Engineering., 72 (2006) 1510 (in Japanese).
- 16) C.Chang A.Chen, and Pei-Hsiun.Chao: Surface Texture Analysis of Fixed and Free Abrasive Machining of Silicon Substrates for Solar Cells, Advanced Materials Research Vols., 126-128 (2010) 177.
- 17) J.Yan, K.Syoji and T.Kuriyagawa: Chip Morphology of Ultra-Precision Diamond Turning of Single Crystal Silicon, Japan society for Precision Engineering., 65, 7 (1999) 1008 (in Japanese).