マルチワイヤソーの進化と延性モード加工*

Improvement of Multi-Wire Saw and Ductile Mode Slicing

諏訪部仁**

Hitoshi SUWABE

Key words slicing, wire saw, ductile mode processing, mirror surface, resin coated wire tool, diamond wire tool

1. はじめに

スライシング加工は、電子部品の基板等の分野でよく用いられている加工方法で、切断加工の一種であるといえる。現在、日本の国内産業界で利用されている切断加工の分類を図1に示す。同図に示すように機械的エネルギー、電気的エネルギー、光学的エネルギーを利用した方法に分けることができる。また、これらの加工法は切断する材料の特性や目標とする加工時間、加工コスト等の観点からいろいろな加工法がその都度選ばれている。

電子部品の切断加工では、機械的エネルギーを利用した加工法に分類される砥粒加工方式、レーザ加工や放電加工が用いられているが、スライシング加工に限って話をすると、マルチワイヤソーやダイヤモンドワイヤソーが最も利用されている。

そこで、本稿ではマルチワイヤソーを中心に紹介する。

2. マルチワイヤソー

マルチワイヤソーのワイヤ機構図を図2に示す。同図は本研究室にあるワイヤソーのワイヤ機構図である。マルチワイヤソーは、1本のワイヤ工具を新線ボビンから繰り出して、加工部でワイヤを案内する多溝滑車に数十から数百回巻き付け、高速往復走行させながら、硬脆材料をスライシングする加工法である。

1960年代後半に仏国SEA社が開発した質量40kg程度の小型のマルチワイヤソー¹⁾が日本に導入された。そして、国産技術によるワイヤソー²⁾も開発された。しかしながら、電子部品のスライシング加工では、薄いドーナツ形の円板の内周部にダイヤモンド砥粒を電着した工具を用いた内周刃方式(図3参照)が中心となって利用されている。

図1 切断加工の分類

図2 マルチワイヤソーのワイヤ機構図

図3 内周刃方式

*原稿受付 平成29年6月19日

**正会員 金沢工業大学(石川県白山市八東穂3-1)

図4 マルチワイヤソーの進化

図5 揺動振動型マルチワイヤソーの加工部

表 1 切断条件

工作物	材質	SiC, Si, サファイア
	サイズ	2 inch
スラリー	砥粒	ダイヤモンド
	砥粒径 G	2, 3 μm
	ベースオイル	グリコールタイプ
	砥粒濃度 C_o	5 wt%
	供給量 S_a	0.0042 m ³ /min
ワイヤ	芯線径 D	ϕ 0.120 mm
	樹脂厚み T_r	3, 5, 7 μm
ワイヤ線速 V		1000~1300 m/min
新線供給量 F		1 m/min
ワイヤ張力 T		20 N
揺動角度 a		0.5 deg
揺動周波数 f		1.42 Hz
切断速度 C_s		0.08~0.12 mm/min

た。

その後、1980年代の後半になると半導体チップに用いられるシリコンインゴットが大口径化し、それまで用いられてきた内周刃切断機の限界が叫ばれるようになった。それによって、マルチワイヤソーは次代の切断加工法として注目されるようになり、その後、図4に示すように進化してきた。同図のようにワイヤソーが進化するきっかけは、8インチのシリコンインゴットが当時の要求精度を満たす加工ができる装置が開発³⁾されたことによる。これによって、「大口径シリコンインゴットはマルチワイヤソーで切断可能である」ことが認知され、その後の揺動振動を援用した加工法⁴⁾、ワイヤにダイヤモンド砥粒を固着したダイヤモンドワイヤ工具⁴⁾⁵⁾等の開発により急激に発展した。そして、現在ではベースオイルに砥粒を懸濁したスラリーを供給しながらピアノ線で加工する方法が半導体チップ用ウエハ加工に、ダイヤモンドワイヤ工具を用いた加工法が太陽電池用シリコンウエハの加工に、揺動振動を利用した遊離砥粒方式ダイヤモンドワイヤ工具方式がLED用サファイアウエハやパワーデバイス用SiCウエハ加工にそれぞれ用いられている。また、最近では同図に示すように切断面を鏡面に加工することができる延性モード加工に関する報告がされるようになってきた。延性モード加工法は、遊離砥粒方式⁶⁾ならびに固定砥粒方式⁷⁾それぞれで開発が進められている。そこで本稿では、著者らの研究室で行っているダイヤモンドスラリー（遊離砥粒）を利用した延性モード加工とダイヤモンドワイヤ工具を利用した延性モード加工の現状を報告する。

3. ダイヤモンドスラリーを用いたマルチワイヤソーによる延性モード加工

3.1 実験装置

図5に本研究で使用した揺動型マルチワイヤソーの加工部のモデル図を示す。加工を行う際には、同図に示すようにメインローラに樹脂コーティングワイヤを多数回巻き

付け、ワイヤを高速往復運動させ、スラリ－を加工部へと連続供給した。また、揺動振動は同図拡大図に示すように、加工部の2個のメインローラの間接点を中心として $\pm 0.5^\circ$ の揺動振動を付加させた。そして、工作物を上昇させ、高速走行しているワイヤに工作物を押し当て、切断加工を行った。なお、Siの切断実験では、揺動振動を止めて工作物を切断加工して評価した。表1に本実験の主な実験条件を示す。

3.2 実験に使用した樹脂コーティングワイヤ

図6に樹脂コーティングワイヤ（膜厚：5 μ m）の観察写真を示す。同図（a）はワイヤの表面観察写真で、同図（b）はワイヤの断面写真をそれぞれ示してある。同図に示すように加工で用いたワイヤはピアノ線表面に透明な樹脂がコーティングされているだけである。

3.3 切断後のウエハの表面

延性モードスライシング加工したウエハの加工面の様子
を示すために、Si と SiC のウエハに対して文字の反射状
況を観察した。

・ Si の場合

加工後のウエハ表面の観察結果を図7に示す。同図

(a) 外観

(b) ワイヤ断面

図6 樹脂コーティングワイヤ

(a) ピアノ線

(b) 延性モード加工

図7 ウエハ表面の文字反射の様子 (Si の場合)

(a) はダイヤモンドスラリーを用いてピアノ線で切断した場合であり、同図 (b) は延性モード加工の場合である。これらの結果より、ピアノ線を用いた場合では、ウエハ表面は梨地状加工面となっており、ウエハ表面は灰色で、文字はまったく写っていないことが分かる。これに対して、同図 (b) に示すように樹脂コーティングワイヤを用いた場合では、「金沢工業大学」の文字がウエハ表面にはっきりと写る程度まで良好な鏡面を得ることが確認できた。

・SiC の場合

図8に加工後のウエハ表面の写真を示す。同図より、揺動振動を利用した樹脂コーティングワイヤ方式によりSiCの切断を行うことによって、その切断されたウエハ表面はSi面、C面ともに鏡面加工となっていることが明らかとなった。

(a) Si 面

(b) C 面

5 mm

図8 SiC ウエハの加工表面

図9 Si 加工時の切り屑の観察写真

図10 SiC 加工時の切り屑の観察

3.4 切り屑の観察

延性モード研削は金属の加工で行われているが、SiやSiCのような脆性材料の切り屑は、せん断変形する前に引張り破壊するので、流れ型の切り屑は形成されない。しかし、切込み量を極めて小さくすることによって延性モード研削が可能になる⁷⁾と報告されている。延性モード加工の条件として硬脆材料の加工面が鏡面になることに加えて、流れ型の切り屑が発生することが必要になる。そこで、樹脂コーティングワイヤを用いて、切断加工を行ったときのスラリー中から切り屑を回収し、その観察を行った。

・Si の場合

Siを本加工方式でスライシング加工したときの切り屑の観察結果を図9に示す。同図の丸枠内に示すように、樹脂コーティングワイヤとダイヤモンド砥粒を用いた場合の切り屑は流れ型の形状をしていることが確認できる。

・SiC の場合

図10はSiC切断後の切り屑の観察写真を示す。同図より、SiCにおいても切り屑の形状が流れ型となっていることが分かる。

以上述べた3.3と3.4の観察結果から、樹脂コーティン

図 11 表面クラック層の観察写真 (Si)

グワイヤを用いて加工すると、延性モード加工が実現できていると判断される。

3.5 切断後のウエハの表面ダメージ

本稿で解説している延性モード加工では、切断面に文字が写るほどの鏡面加工が実現できることは記述した。しかしながら、デバイスプロセスにおいては文字が写るだけでは十分なメリットとはいえない。そこで、切断後のウエハの加工ダメージを評価した。

・Si の場合

半導体シリコンウエハの加工面のダメージを測定する方法は、通常斜め研磨した加工面を腐食することによって、表面クラック層の観察を行っている。そこで、斜め研磨法を用いてスライシング加工後のウエハに対してクラック層を測定した結果を図 11 に示す。同図 (a) はピアノ線を用いた場合で、同図 (b) は樹脂厚みが $6\mu\text{m}$ の樹脂コーティングワイヤを用いた場合である。同図 (a) より、ピアノ線を用いてダイヤモンドスラリーで切断した場合には、ウエハの最表面から $8\mu\text{m}$ 程度の深さにかけて表面クラック層が生じている。それに対して、同図 (b) より、樹脂コーティングワイヤを用いた場合では、ウエハの最表面から $2\mu\text{m}$ 程度の深さにかけて表面クラック層を生じており、ピアノ線を用いた場合と比較して表面クラック層は約 $1/4$ まで低減できることが確認できた。これより、樹脂コーティングワイヤを用いることによって、表面クラック層は大幅に低減できることが明らかとなった。

・SiC の場合

SiC ウエハの加工表面のダメージは Si と異なり、TEM 観察により加工変質層を測定している。そのため、本実験においても同様な方法で観察を行った。図 12 に TEM 観察写真を示す。同図 (a) は固定砥粒方式を用いて加工したウエハ、同図 (b) に粒径 $2\mu\text{m}$ 、同図 (c) に粒径 $3\mu\text{m}$ の砥粒を用いたときのウエハの表面写真を示す。同図 (a) より、固定砥粒加工によるウエハ切断面の加工変質層は、ウエハ表面から $5\mu\text{m}$ 以上の位置にまで加工変質層が存在することが明らかとなった。これに対して、樹脂コーティングワイヤ方式で切断した同図 (b)、(c) で示す加工変質層は、それぞれ 58nm 、 276nm まで向上させることができた。

(a) 固定砥粒加工

(b) 膜厚: $2\mu\text{m}$ (c) 膜厚: $3\mu\text{m}$

図 12 ウエハ切断面の加工変質層の TEM 観察 (SiC)

(a) ピアノ線+GC 砥粒スラリーの場合

(b) 樹脂コーティングワイヤ+ダイヤモンドスラリーの場合

図 13 ソーダガラスの切断面観察写真

以上の結果より、樹脂コーティングワイヤ方式を用いると、現在用いられている遊離砥粒方式や固定砥粒方式よりも加工変質層を大幅に低減できることが明らかとなった。今後ウエハの薄板化が進むと、本加工方式のように加工変質層が小さくできる加工法は有効な方法の一つであると期待できる。

3.6 ソーダガラスとサファイアの加工

図 13 にソーダガラスを切断加工後のウエハ表面の全体写真を示す。同図 (a) はピアノ線と GC 砥粒を用いた加工方式で加工したウエハ、同図 (b) は樹脂コーティングワイヤ方式で加工したウエハをそれぞれ示している。これらのウエハは「金沢工業大学」と書かれた紙の上に厚さ 18.5mm のガラスとウエハを重ねて置き、ウエハの上部から撮影した。同図より、ピアノ線+GC 砥粒で加工したガラスは加工面が曇り、文字が見えないのに対して、樹脂コーティングワイヤ方式で加工したガラスは金沢工業大学の文字を確認でき、ウエハが透明であることが分かる。

図 14 にサファイアウエハの観察写真を示す。同図は図 13 と同様に「K.I.T.」と書かれた紙の上に厚さ 18.5mm の

図 14 サファイアの切断面観察写真

表 2 切断実験条件

工作物	種 類	ソーダガラス
	寸 法	100×25×10 mm
ワイヤ	外 径	0.14 mm
	砥粒径	10~20 μm
加工液	種 類	グリコール、ソルビトール
ワイヤ張力		20 N
ワイヤ走行速度		300 m/min
ワイヤ往復ストローク		28 m
揺動角度		± 10 deg
振動数		0.141 Hz

ガラスとウエハを重ねて置き、ウエハの上部から撮影した。同図より、ウエハは背面に書かれた「K.I.T.」の文字を視認することができ、ウエハの加工面が透明になっていることが分かる。

以上述べたように、本加工方式は、Si や SiC のみならず、ソーダガラスやサファイアも十分加工することが可能であることが明らかとなった。

4. ダイヤモンドワイヤを用いたマルチワイヤソーによる延性モード加工

前章までにダイヤモンドスラリ（遊離砥粒方式）を用いた延性モード加工の可能性を示した。そこで、食品添加物の一種であるソルビトールを加工液として用いたダイヤモンドワイヤソーでの延性モード加工の可能性を探った結果を以下に述べる。

4.1 加工液の違いがウエハ表面に与える影響

表 2 に主な実験条件を示す。

図 15 に半導体用加工液と人工甘味料のソルビトールを用いて加工したウエハ表面を示す。同図 (a) は半導体用加工液を用いて加工したウエハ、同図 (b) はソルビトールを用いて加工したウエハを示している。ウエハは『金沢工業大学』と書かれた紙の上に 3.5 で既述した方法で観察した結果である。同図より、ソルビトールを用いた加工後のウエハは、半導体用加工液を用いて加工したウエハと比較して、透明な面が得られ、延性モード加工の可能性を示していることが分かった。現時点ではこの作用のメカニズムはほとんど分かっていない。今後の研究の成果に期待したい。

(a) 半導体用加工液

(b) ソルビトール

20 mm

図 15 切断後のウエハの観察写真（ソーダガラス）

5. お わ り に

スライシング加工といえば、現在ではマルチワイヤソーが一般的である。マルチワイヤソーは遊離砥粒方式と固定砥粒方式の 2 種類の方法が市場で用いられている。これらの 2 種類の次代の方法として期待できる新たな加工法として、遊離砥粒方式と固定砥粒方式の延性モード加工を紹介した。著者らの研究グループは、次世代のスライシング加工は延性モードスライシング加工が中心となることを期待している。しかしながら、最近ではワイヤ放電加工やレーザースライシングも注目を集めるようになっている。

将来的にどの技術が次世代として活躍するのか現時点では不明であるが、マルチワイヤソーを含めて今後の発展に期待している。本稿を読んでいただきました読者の皆さまに興味を持っていただけると幸いに思います

参 考 文 献

- 1) 仏国 SEA 社、当時のカタログ
- 2) 安永、当時のカタログ
- 3) コマツ NTC、当時のカタログ
- 4) タカトリ、当時のカタログ
- 5) 例えば、旭ダイヤモンド工業、当時のカタログ
- 6) 諏訪部仁ほか：マルチワイヤソーによる SiC の延性モードスライシング加工に関する研究、砥粒加工学会誌、**60**, 2 (2016) 91-96.
- 7) 諏訪部仁ほか：食品添加物を加工液として用いたダイヤモンドワイヤソーの加工特性、2016 年度精密工学会秋季大会学術講演文集、(2016) 127-128.
- 8) 海野邦昭：研削加工の基礎、日刊工業新聞社、(2006) 48-51.

諏訪部仁

1989 年金沢工業大学大学院工学研究科博士課程修了、工学博士。現在、金沢工業大学工学部機械工学科教授。砥粒加工、スライシング加工、研磨加工、振動援用加工等の研究に従事。