ワーク回転型マルチワイヤソーのスライシング性能に関する研究*

—束状被削材方式に関する基礎的実験—

坂本 智** 近藤康雄*** 山口顕司† 能登成美†† 濱本寛子††† 秋田徳夫‡

A Study on Slicing Performance of Work Rotating Type Multi-Wire Saw
-Fundamental Experiments on Characteristics of Bundled Workpieces Method-

Satoshi SAKAMOTO, Yasuo KONDO, Kenji YAMAGUCHI,
Shigemi NOTO, Hiroko HAMAMOTO and Norio AKITA

Work rotating type multi-wire sawing is a superior slicing method of hard and brittle materials represented by silicon ingots and ceramics. However, this slicing method has some problems. The bundled workpieces method was suggested in order to solve some such problems. The main purpose of this study is to make clear the fundamental slicing performance of work rotating type multi-wire saw which applied bundled workpieces method. Work material used in this study is borosilicate glass bundled up. The main results obtained are as follows. (1) Bundled workpieces method has applicability for rapid feed of work material, and sliced surface is not susceptible to the feed speed of work material. (2) Sliced surface roughness is different from initial sliced surface in final sliced surface slightly. Initial sliced surface is a little excellent in comparison with final sliced surface. (3) Slicing rate improves slightly by controlling a rotating speed of work material. (4) Stable slicing can be expected by increasing work material to bundle up. (5) As for the shape of work material to bundle up, slicing is possible even besides a column. (6) When shape of work material includes an edge, kerf width of a part of an edge tends to become wide.

Key words : slicing, multi-wire sawing, slicing performance, surface roughness, hard and brittle materials

1. 緒 言

マルチワイヤソーのさらなる高精度・高効率化を主な目的とし、これまでワーク回転型マルチワイヤソーの研究開発を進めてきた¹⁾。ワーク回転型マルチワイヤソーは様々な利点を有するものの、大口径シリコンインゴットのスライシングに適用する上では、まだいくつかの問題点が残されている。その一つとして被削材の保持方法が挙げられる。すなわち、現状ではスライシング終了間際に被削材中心部で切り飛ばしや切り残し（以後、切り飛ばし等）を生じてしまったり、自重により中心部が破断してしまう恐れがある。このような問題点の解決方法として、前報²⁾では束状被削材方式の提案を行った。束状被削材方式とは、複数本の被削材を心材に束ね、束状にした被削材を回転させながら同時にスライシングを行うスライシング方法である。

本報では、様々なスライシング条件下でのスライシング実験を行い、ワーク回転型マルチワイヤソーに束状被削材方式を採用した場合の基礎的なスライシング性能について調べた結果を報告する。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験に用いた束状被削材の模式図を、図2に束状被削材方式によるスライシング時の簡単な模式図を示す。実験に用いた束状被削材は、金属製の心材に複数本の被削材をエポキシ樹脂で固定し、その外周部を石膏で円柱状に成形している。束状被削材では心材がベース材の役割を果たすため、スライシング終了間際に被削材を簡易固定する必要がなく、スライシング後にウェハが散乱することを未然に防ぐことが可能である。また、被削材の回転軸をスライシング面内にとらないため、被削材の切り飛ばし等も生じない。

表1に実験に使用した材料と主な実験条件を示す。被削材には、硼硅酸ガラス（円柱状（φ20mm）、一部の実験では角柱状（□17.8mm））を金属製の心材（SS400製、円柱状（φ20mm）、一部の実験では八角柱）に複数本束ねた束状被削材（最外径φ60mm）を用いた。被削材の回転方向はワイヤの走行方向と同一方向とし、回転速度は被削材外周速度で2.4～33m/minとし

Fig. 1 Schematic illustration of bundled work

* 原稿受付 平成16年8月11日

** 正会員 鳴門教育大学（鳴門市鳴門町高島字中島748）

*** 正会員 鳥取大学大学院（鳥取市湖山町南4-101）

† 正会員 米子工業高等専門学校（米子市彦名町4448）

†† 正会員 鳥取大学大学院

（現、野田・杉本特許事務所；大阪市西区江戸堀1-10-2）

††† 鳥取大学大学院

（現、ファミリー株式会社；大阪市東淀川区東中島1-17-26）

‡ 鳥取大学工学部（現、大鳥機工機；鳥取市南栄町19）

た、ワイヤにはプラスめっき鋼線ワイヤ ($\phi 0.18\text{mm}$) を用いた。ワイヤに与える張力は 20N とし、ワイヤの走行速度を $200 \sim 1000\text{m/min}$ まで変化させて実験は行った。また、スラリーには水溶性加工液に GC 砥粒 ($\#800$) を混濁させた水溶性スラリーを用い、スラリー中の砥粒濃度は重量比で $50\text{wt}\%$ とした。なお、スラリーの粘度変化等を極力抑えるため、実験棟内の室温は 25°C 一定として実験は行い、スライシング面粗さの測定は特に断らない限り、被削材の中央部で行った。

3. 実験結果

3.1 被削材送り速度の影響

図3に被削材送り速度とスライシング性能との関係を示す。図はワイヤ走行速度を 400m/min 、被削材の回転速度を 4.7m/min 一定とし、被削材送り速度を $0.6 \sim 1.4\text{mm/min}$ まで変化させた場合の結果である。図より、被削材送り速度を増加させるとスライシング速度*は増加する傾向にあることがわかる。また、スライシング面粗さは送り速度の変化に関わらず、ほぼ一定値を示す傾向にあることがわかる。被削材が回転することにより、被削材送り速度を増加させてもスラリーの供給性・切りくずの排出性等は良好な状態で維持されているものと推測できる。逆に被削材送り速度を減少させた場合、スライシング速度が低下(スライシング時間が増加)するため、ラッピング効果³⁾によるスライシング面粗さの向上が期待されたが、顕著な効果は得られなかった。

図4に被削材送り速度を 1.4mm/min とした場合のスライシング面の一例を示す。図より、高送り速度でスライシングを行っても、被削材中心部で切り飛ばし等を生じていないことがわかる。また、スライシング面上に顕著なソーマーク等も認められ

Fig. 2 Schematic illustration of bundled work slicing

Table 1 Materials used and main experimental conditions

Work	
Type	Bundled type, $\phi 60$
Material	Borosilicate glass, $\phi 20$ ($\square 17.8$)
Core material	SS400, $\phi 20$ (Octagonal pillar)
Molding material	Plaster
Feed speed f	$0.6 - 1.4 \text{ mm/min}$
Rotational speed V_w	$2.4 - 33 \text{ m/min}$
Wire	
Material	Brass plated steel wire, $\phi 0.18$
Tension	20 N
Running speed V	$200 - 1000 \text{ m/min}$
Slurry	
Base oil	Water-soluble liquid
Abrasive grain	GC, $\#800$
Concentration	$50 \text{ wt}\%$
Room temperature	25°C

*本研究では、単位時間に加工される被削材の断面積(石膏部を除いたガラス部のみの断面積)からスライシング速度を算出している。

ず、束状被削材方式を採用することで、十分高送り速度に対応可能であることがわかる。しかし、過度に被削材送り速度を増加させると、ワイヤのたわみ量が過大となり、最悪の場合にはワイヤの断線を生じてしまう恐れがある。そのため安全を考慮し、以後の実験における被削材送り速度は 1.0mm/min とした。

3.2 ワイヤ走行速度の影響

図5にワイヤ走行速度とスライシング性能との関係を示す。図は被削材の回転速度を 4.7m/min 一定とし、ワイヤ走行速度を $200 \sim 1000\text{m/min}$ まで変化させた場合の結果である。図より、ワイヤ走行速度が増加すると、スライシング速度も増加する傾向にあることがわかる。このことは、ワイヤ走行速度の増加に伴い、スラリーの供給性(引き込み性)が向上し、十分な厚さのスラリー層⁴⁾が加工部(ワイヤと被削材との接触部位)に形成されることが一因として考えられる。また、ワイヤによって運ばれる砥粒の速度が高速となり、切削性が向上することも要因の一つとして考えられる。しかしワイヤ走行速度 400m/min

Fig. 3 Relation between feed speed and slicing performance

Fig. 4 Photograph of sliced surface ($f=1.4\text{mm/min}$)

Fig. 5 Relation between running speed of wire and slicing performance

以上では、ばらつきはあるもののほぼ一定値を示す傾向にあり、ワイヤ走行速度の増加に伴うスライシング性能の向上には一定の限度があるものと考えられる。

一方、スライシング面粗さはワイヤ走行速度が増加すると、若干劣化する傾向にあることがわかる。このことは、ワイヤ走行速度の増加に伴うスライシング速度の増加により、ラッピング効果が減少（ラッピング時間の減少）してしまうことが要因の一つとして考えられる。

これらの結果を考慮し、以後の実験では特に断らない限り、ワイヤ走行速度は 400m/min として実験は行った。

3.3 被削材回転速度の影響

図 6 に被削材回転速度とスライシング性能との関係を示す。図より、被削材回転速度が 4.7m/min 以上となるとスライシング速度は低下する傾向にあることがわかる。本実験ではワイヤと被削材が同一方向に回転しているため、被削材回転速度の増加に伴い加工部におけるワイヤと被削材間の相対速度は低下してしまう。また、遠心力により加工部へのスラリーの浸入が阻害される恐れもある。これらの影響が一因となって砥粒の切削性が低下し、スライシング速度が低下したのと考えられる。しかし、被削材回転速度をさらに低速度（本実験では 2.4m/min）とすると、スライシング速度は減少してしまっている。被削材の回転速度が極低速度となると、スラリーの供給性・切りくずの排出性の向上といったワーク回転型マルチワイヤソーの有する利点が損なわれてしまうことが原因の一つであると考えられる。これらのことより、被削材の回転速度には最適回転速度が存在し、本実験における被削材回転速度は 4.7m/min 程度が適当であることがわかる。以後の実験では特に断らない限り、被削材回転速度は 4.7m/min とした。

一方、スライシング面粗さは被削材回転速度に関わらず、ほぼ一定値を示す傾向にあることがわかる。当初、被削材の回転速度が増加するほど既スライシング面に施されるラッピング効果が増大し、スライシング面粗さは向上するものと考えられたが、顕著な効果は認められなかった。束状被削材方式では従来

Fig. 6 Relation between rotational speed of work and slicing performance

Fig. 7 Definition of measuring range

のワーク回転方式（被削材 1 本のみ回転）とは異なり、束ねられた個々の被削材が断続的にスラリーを介してワイヤと接している。そのため、常時ワイヤと被削材とがスラリーを介して接している従来のワーク回転方式に比べ、ラッピング効果が減少したのと考えられる。また、スライシング面全体を平均的に評価するため、ラッピング効果の現れやすいスライシング面の周辺部ではなく、中央部分でスライシング面粗さの測定を行ったことも要因の一つとして考えられる。そこで、図 7 に示すようにスライシング面を初期・中期・後期生成面の 3 つに区分し、各々の部分での詳細なスライシング面粗さの測定を行った。

図 8 にスライシング初期・中期・後期生成面各部におけるスライシング面粗さの比較を示す。図より、各部位におけるスライシング面粗さに顕著な差異は認められないものの、スライシング初期生成面が中期・後期生成面に比較して若干良好であることがわかる。最も長い時間ラッピング効果を施されることが、スライシング初期生成面の粗さが向上する要因の一つとして考えられる。

本実験における被削材回転速度は束状被削材の外周速度としているため、加工部における実質的な被削材回転速度はスライシング開始時から終了時にかけて減少する。そこで、被削材回転数を制御し、加工部での回転速度を一定に保った場合との比較実験を行った。

図 9 に被削材の外周速度を 4.7m/min 一定とした場合と被削材回転数を制御し、加工部での回転速度を 4.7m/min に保った場合とのスライシング性能の比較を示す。図より、被削材の回転数をコントロールし、加工部での回転速度を一定に保つことで、若干ではあるもののスライシング速度が向上する傾向にあることがわかる。しかし、スライシング面粗さはほぼ同等であり、両者に顕著な差異は認められなかった。本実験における束状被削材の最外径は $\phi 60$ mm と小さいため、両者に顕著な差異

Fig. 8 Comparison of surface roughness

Fig. 9 Comparison of slicing performance

は認められなかったものと考えられる。しかし、被削材の径が大きくなった場合、被削材の回転数をコントロールすることでスライシング速度の向上等の効果が現れるものと推測される。

3.4 束ねる被削材の本数による影響

束状被削材として束ねる被削材の本数は、スライシング性能にも大きな影響を与えるものと考えられる。そこで図10に示すような、束ねる被削材の本数を変化させた束状被削材を用いてスライシング実験を行った。被削材 A は心材の周りに6本の被削材を束ねたもの、被削材 B は同様に3本等間隔に束ねたもの、被削材 C は1本だけ心材に取り付けたものである。切断溝幅およびチップング幅の測定は、各々図中の(A)、(B)、(C)点で行った。なお、束ねる被削材の本数によっては不安定なスライシング状態となることが予測されるため、本実験におけるワイヤ走行速度は若干低速(300m/min)にして実験を行った。

図11に束ねる被削材の本数がスライシング性能におよぼす影響を示す。図より、束ねる被削材の本数が増えるほど、スライシング時間は長くなる傾向にあるものの、スライシング速度は向上する傾向にあることがわかる。束ねる被削材の本数が増えるほど、1回のスライシングにおける切断面積が増大し、スライシング効率が向上したものと考えられる。

一方、スライシング面粗さは束ねる被削材の本数が増えるほど若干向上する傾向にあるが、顕著な差異は認められなかった。しかし、束ねる被削材の径が大径化すると、ワイヤのたわみ量が大きく変動するため、スライシング面にうねりを生じる

Fig. 10 Cross section of bundled work

Fig. 11 Influence of bundled type on slicing performance

Fig. 12 Influence of bundled type on kerf width

等の影響をおよぼすものと推測される。

図12に束ねる被削材の本数が切断溝幅におよぼす影響を示す。図より、束ねる被削材の本数が少なくなるほど、切断溝幅は大きくなる傾向にあることがわかる。このことは、被削材(ガラス部)と石膏部とでは被削性が異なるため、ワイヤのたわみ量が大きく変動したり、ワイヤの軌道が定まり難くなることが要因の一つとして考えられる。すなわち、被削材の本数が少なくなるとワイヤの走行時にブレが生じ易くなり、切断溝幅が増加する傾向にあるものと考えられる。

図13に測定するチップング幅の定義を示す。本研究では、最大チップング幅の測定とともに、定常的に生じる平均的なチップング幅を平均チップング幅として測定した。なお、測定範囲は図10中に示した(A)、(B)、(C)点からワイヤ走行方向に±5mmとした。

図14に束ねる被削材の本数と最大チップング幅との関係を示す。図より、束ねる被削材の本数と最大チップング幅との間に相関は認められないことがわかる。最大チップング幅は突発的に生じる大きなチップングの幅を表しているため、今回の実験では明確な傾向が現れ難かったものと考えられる。そこで、定常的なチップング幅を表す平均チップング幅の比較を行った。図15に束ねる被削材の本数と平均チップング幅との関係を示す。図より、束ねる被削材の本数を少なくすると平均チップング幅は大きくなる傾向にあることがわかる。束ねる被削材の本数が少ない場合、ワイヤのたわみ量が大きく変動したり、ワイヤの軌道が安定し難い不安定なスライシング状態となることが原因の一つとして考えられる。束ねる被削材の本数を多くすることで、ワイヤの過度なたわみやブレを生じない安定したスライシングが期待できる。

3.5 束ねる被削材の形状による影響

束状被削材方式を採用することで、被削材の形状が円柱状以外の形状でもワーク回転型マルチワイヤソーによるスライシン

Fig. 13 Definition of chipping width

Fig. 14 Influence of bundled type on maximum chipping width

Fig. 15 Influence of bundled type on mean chipping width

Fig. 16 Cross section of bundled work

グが可能となる。そこで図16に示すような束状被削材のスライシング性能について検討した。図に示す束状被削材D, Eは、被削材（ガラス部）の断面積をほぼ同じ面積としており、各々の被削材断面積は、被削材Dで約 $314 \times 4 \text{ mm}^2$ 、被削材Eで約 $317 \times 4 \text{ mm}^2$ である。なお、被削材Dにおける切断溝幅の測定位置は(D)点とし、被削材Eにおける切断溝幅の測定位置は、被削材形状の影響を受けやすいと考えられる(E-1)点、(E-2)点の2カ所とした。

図17に束ねる被削材の形状がスライシング性能におよぼす影響を示す。図より、スライシング速度、スライシング面粗さとも、両者に顕著な差異は認められず、束ねる被削材の形状がスライシング性能におよぼす影響は少ないことがわかる。すなわち、各種断面形状を持つ被削材にも十分対応可能であることがわかる。

図18に束ねる被削材の形状と切断溝幅との関係を示す。図より、(D)点と(E-1)点とは顕著な差異は認められないことがわかる。しかし、(E-2)点では(D)、(E-1)点に比べ切断溝幅が増加していることがわかる。角の部分のスライシングでは、ワイヤと被削材との接触長さも短く、ワイヤの軌道が安定し難いことが切断溝幅増加の一因として考えられる。

4. 結 言

さらなる高精度・高効率スライシングの実現を目指し、ワーク回転型マルチワイヤソーに束状被削材方式を採用した場合の基本的なスライシング性能について調べた。各種条件下でスライシング実験を行った結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 束状被削材方式を採用することで、高送り速度にも十分対応可能となる。
- (2) 初期スライシング生成面の粗さが若干良好となるものの、中期・後期生成面との大きな差異は認められない。
- (3) 被削材の回転速度を制御することで、スライシング速度は若干向上する。

Fig. 17 Influence of work shape on slicing performance

Fig. 18 Comparison of kerf width

- (4) 束ねる被削材の本数が多いほど、安定したスライシング状態が期待できる。
- (5) 束ねる被削材の形状が円柱状以外の形状でも、同等のスライシング性能が期待できる。
- (6) 角の部分を含む被削材をスライスする場合、角の部分の切断溝幅が大きくなる傾向にある。

謝 辞

最後に、本研究を遂行するにあたりご協力いただいた鳥取大学工学部岡村 進技官ならびに当時の鳥取大学卒研伊藤真栄氏、中澤 誉氏、中村宏幸氏に深謝いたします。

また、実験に使用するワイヤを提供していただいたトクセン工業株式会社および加工液・被削材等を提供していただいた株式会社興人に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 例えば、坂本 智, 小幡文雄, 田中久隆, 鳥居弘稔, 能登成美: ワーク回転型マルチワイヤソーに関する基礎的実験—装置の原理と基礎実験—, 精密工学会誌, 66, 12(2000)1948.
- 2) 坂本 智, 田中久隆, 能登成美, 伊藤真栄, 秋田徳夫: ワーク回転型マルチワイヤソーのスライシング性能に関する研究—束状被削材方式の提案—, 精密工学会誌, 69, 7(2003)955.
- 3) 坂本 智, 田中久隆, 濱本寛子, 中澤 誉, 中村宏幸, 秋田徳夫: ワーク回転型マルチワイヤソーのスライシング性能に関する研究—ラッピング効果に関する一考察—, 先端加工, 21, 2(2003)40.
- 4) 例えば、大石 弘, 浅川慶一郎, 塚本和繁, 宇野義幸: マルチ・ワイヤソー切断におけるワイヤ走行速度およびインゴット送り速度の効果—φ400mmシリコンインゴットの切断に関する研究(第2報)—, 精密工学会誌, 67, 5(2001)791.