

複雑形状の微細切断の研究(第1報) — 基本原理と基礎実験装置開発 —

矢澤孝哲*・峯田航**・扇谷保彦*・小島龍広***・石川圭一†

A basic study on precision cutting of free form using diamond abrasive wire
- Proposal of concept and development of prototype unit for initial experiments -

by

Takanori YAZAWA *, Kou MINETA **, Yasuhiko Ougiya *, Tatsuhiro KOJIMA *** and Keiichi
ISHIKAWA †

Recently, many cut off processes are research and development. In the production process such as the silicon wafer or the crystal resonator, the multi-wire saw is often used. But, the cut off in free form is difficult by this method. In the case of free form cutting, wire EDM, laser cutting and waterjet machining are properly used by work material and work thickness, etc. In other words, the wire EDM is not adapted for non-conducting material, and it is difficult by the laser cutting and the waterjet machining that the thick workpiece is cut off with thin cutting width.

So, the author proposes free form cut off method using diamond abrasive wire for non-conductive material such as optical glass. In this research, concept of proposal method and development of cut off unit for initial experiment are reported.

Key words: Wire saw, Diamond abrasive wire, Free form cut off

1. 緒言

近年、光学機器の小型化・高密度化に伴い、各種光学部品の複合化、小型化が進んでおり、非軸対称光学部品の高精度加工が望まれている。一方、シリコンウエハの大口径化により、シリコンインゴットのスライディング工程には直線状の切断加工を得意とし、切断ロスが少なく高精度、高能率に切断加工できるマルチワイヤソーが多用されている¹⁾²⁾。この加工法は、被切断材料を選ばないこと、高アスペクトで多数の同時切断が可能であるといった利点も有する反面、直線状にしか切断できず、複雑な形状の切断には不向きであるという問題点がある。この複雑な形状の切断には、現

在のところ、ワイヤ放電加工、レーザ加工、ウォータージェット加工が用いられている。ワイヤ放電加工は、被加工材料の硬さによらずアスペクトの高い複雑な形状を高精度に加工できるが、導電性の材料しか加工できないという致命的な問題点を有する。また、レーザ加工やウォータージェット加工では、高アスペクトな切断はその原理上難しい。このため、非軸対称光学部品特にマイクロ光学部品の加工には、マイクロ研削加工から研磨加工のプロセスが主流であるが、形状が複雑になるほど長時間を要し、砥石摩耗の抑制と補正が必要になるばかりでなく、削り取られる材料が無駄になるといった問題点もある。

平成18年6月23日受理

* 機械システム工学講座 (Department of Mechanical Systems)

** 機械システム工学科(現三菱電機) (Department of Mechanical Systems Present address: Mitsubishi Electric)

*** 教育研究支援部機械系技術室 ()

† 大学院生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

以上の問題点を克服する方法として本研究では、単一ワイヤを用い、切断で発生する力を常に一定方向にかかるとすることで、非導電性材料であっても複雑な形状に、微細な切断幅で、高アスペクト・高精度加工する加工方法を提案し、基本実験装置試作とテスト加工結果について報告する。

2. ワイヤソーによる微細切断機構

2.1 切断における問題点

いま、図1のように材料を正弦波状に切断加工することを考える。ここで、切断加工中に発生する力(以下、切断力と呼ぶ)は大別すると F_p と F_n になる。このうち F_p は、砥粒走行により発生する力であり、切断面の表面粗さに影響するものの切断幅など寸法・形状精度に直接影響しない。これに対して F_n も、直線状に切断する場合には寸法・形状精度には影響しない。しかし、正弦波状に切断する場合には、状況は大いに異なる。図2(a)に切断における力学モデルを示す。ここでワイヤ垂直方向の剛性を K_w 、ワイヤ支持系の剛性を K_a とすると、切断力 F_n に対してこれらが支えることになる。ここで図2(b)に示すように、 F_n が支持系に対して θ なる角度を持つ場合、 F_n の X 方向成分力 F_{nx} が発生する。この F_{nx} により、ワイヤが横にずれを起こし、精度劣化の原因になる。さらにこれが大きくなると、ワイヤがガイドを削る、ワイヤがガイドから逸脱する、ワイヤが切れるといった切断自体を妨げる問題も発生してしまう。

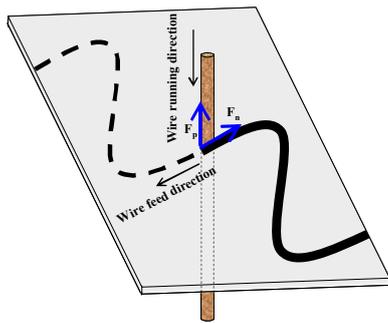


Fig.1 Schema of sin wave cutting by wire saw

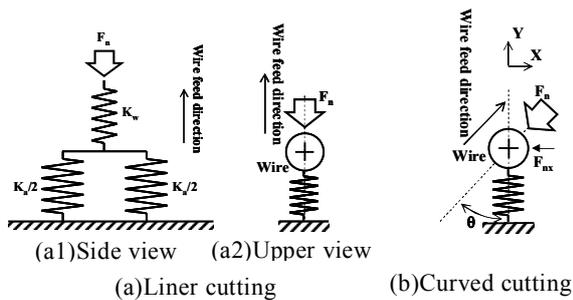


Fig.2 Dynamic model of wire sawing

2.2 複雑形状微細切断の原理

前述の問題は、切断力 F_n が支持系に対して角度を持つために発生するのであるから、切断力 F_n の角度を常に0にするように支持方向を保てばよい。すなわち、図3に示すように、ワイヤの中心を回転中心として支持系を回転させ、常にワイヤ送り方向に平行になるように制御する。これにより、 F_{nx} の発生は抑えられ、精度劣化や切断の妨げの問題といったリスクを回避することができる。

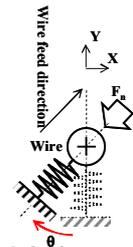


Fig.3 Swing system

2.3 装置の基本構想

図4に基本構想概略図を示す。装置は大別すると首振り機構を備えた駆動アーム(以下、首振りアームと略す)と、加工用ワイヤ搬送ドラム部(以下、ドラムユニットと略す)になる。首振りアームは、文字通りワイヤ中心を回転中心として回転する支持系である。これに対してドラムユニットは、単なるワイヤの送付、巻取りに寄与するばかりでなく、首振り時にもワイヤにかかる張力が一定になるように保つ働きを持っている。

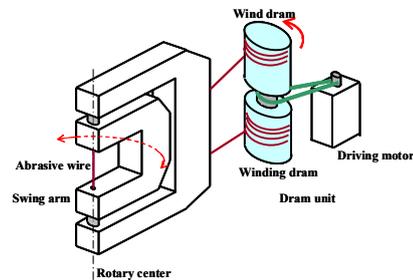


Fig.4 Concept of free form cutting system

3. 直動ユニット試作と微細切断事例

以上の基本構想をもとづき、首振りアームとドラムユニットの製作に必要な基礎実験用に、首振り機能を持たない直動アームを用いた切断ユニット(以下、直動ユニットと略す)を試作した。

取り上げた加工対象は、幅 2mm のアルミ合金 A5052 であり、これを平均直径 0.25mm のダイヤモンドワイヤを用いて 0.28mm の切断幅で切断加工することを目的としている。

3.1 直動ユニットの構成

直動ユニットの基本構成を図5に示す。ダイヤモンドワイヤは、あらかじめ一方のドラムに巻きつけておく。もう一方の巻取りドラムをモータにより回転させ、

ワイヤを巻き取っていく。直動アームに固定させたガイドローラを通りながらワイヤを巻き取っていくことにより、ワイヤを走行させる。そこへ一定の送り速度で工作物を固定させたテーブルを送り、切断加工する。

製作した直動ユニットは、汎用旋盤(滝沢製作所 TAL-900)に取り付け、工具の自動送り機構を利用して切断加工を行った。使用した汎用旋盤の仕様を表1に、旋盤に取り付けた概要図を図6に示す。

3.2 ダイヤモンドワイヤ

マルチワイヤソーによる切断加工では遊離砥粒方式を使用することが多い。しかし、ワイヤ走行速度の制限、油性スラリーによる環境や工作物への汚染、切り屑を含んだスラリー廃棄が必要、などの問題点も挙げ

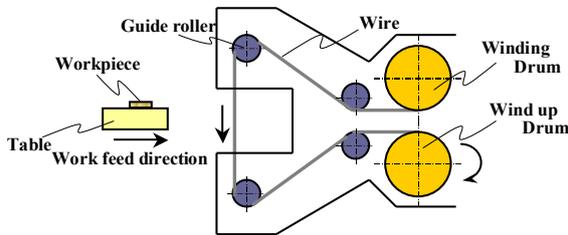


Fig.5 Schema of liner motion wire sawing unit

Table 1 Specifications of ordinary lathe

Model name	TAL-900
Company	TAKISAWA
Length of bed	2000mm
Width of bed	350mm
Main spindle taper	MT6
Center taper	MT4
Power of motor	3.7kW
Longitudinal feed speed	0.035~2.0
Cross-feed speed	0.0175~1.0
Spindle rotation speed	40~1600min⁻¹

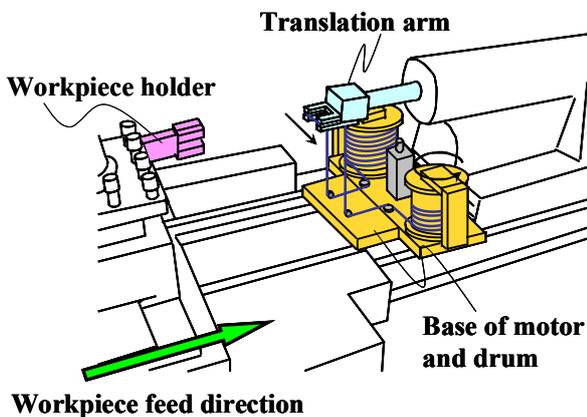


Fig.6 Liner cutting unit on ordinary lathe

られる。それらの問題点解決のため、芯線に砥粒を固着させた固定砥粒式ワイヤソーが検討、開発されてきている。そこで本研究では、固定砥粒式ワイヤソーであるPWS(アライドマテリアル製)を用いた。PWSはピアノ線表面に樹脂ボンドでダイヤモンド砥粒を固着させたダイヤモンドワイヤソーである。使用したPWSの写真を図7に、仕様を表2に示す。



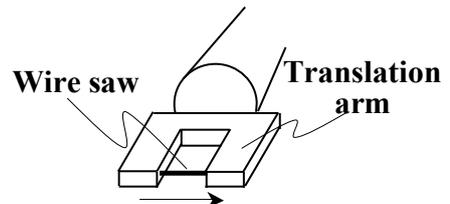
Fig.7 Picture of PWS

Table 2 Specifications of diamond abrasive wire

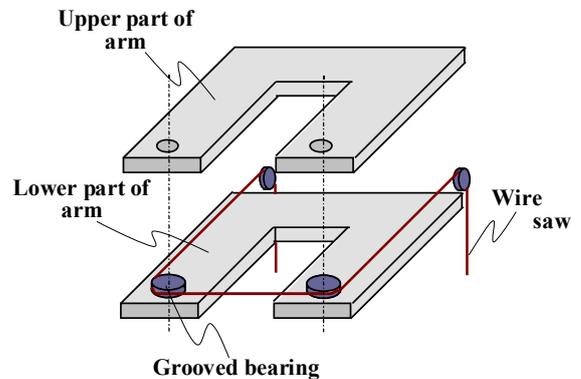
Core wire	Piano wire
Diameter of core wire	0.18mm
Abrasive grain	Diamond
Mean diameter of abrasive grain	42μm
Diameter of PWS	Ave.0.250mm

3.3 加工アーム

加工アームは、ワイヤを走行させるためのガイドローラを固定する役割を持っている。ガイドローラを介してワイヤが走行する直動アーム先端の凹部が加工部となる。図8(a)に概略を、図8(b)にワイヤ走行アームの構造を示す。



(a) Schema of cutting arm unit



(b) Assembly of translation arm

Fig.8 Cutting arm unit

固定砥粒式ワイヤを使用するため、前述のようにワイヤ走行方向変更時にガイドローラを加工してしまうことが考えられる。そこでガイドローラに溝付ベ어링(㈱オリジン電気製)を使用し、溝方向に垂直すなわちガイドローラの半径方向にのみワイヤから力が発生する構造とした。これにより、固定砥粒式ワイヤによるガイドローラ加工や、ワイヤの溝からの脱落を極力抑えることができる。

直動アームの固定には旋盤の心押台を利用した。今回使用した旋盤の心押台のセンタ孔のテーパはモールステーパ MT4 である。そこで、外テーパ寸法が MT4、内テーパ寸法が MT3 のドリルスリーブを利用した。アーム固定台に MT3 のテーパ部を設け、そこにドリルスリーブを取り付けた。

製作した加工アームの写真を図 9 に示す。



Fig.9 Picture of cutting arm unit

3.4 ドラムユニット

ドラムユニットは、モータおよび巻き取りドラムを一体化したものであり、あらかじめワイヤが巻いてあるドラムと、走行したワイヤを巻き取るドラムの2つが、モータをはさんで左右対称になるように配置している。これにより、後述するブレーキパッドとタイミングベルトを入れ替えて付け直すだけで、容易に加工を再開できる。

ワイヤの巻取りを行うドラム径を r 、ドラム最大回転速度を N とし、必要なワイヤ走行速度を v とすれば、

$$r \geq v / 2\pi N \quad \dots(3.1)$$

となる。一方、使用するモータの定格トルクを T_m 、ワイヤにかかる最大張力を T_w とすると、

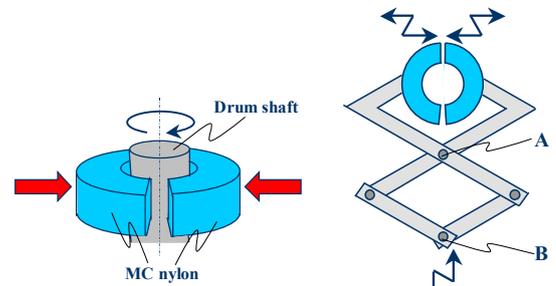
$$r \leq T_m / T_w \quad \dots(3.2)$$

なる関係が成立する。一般的に、砥粒固定式ワイヤソーによる切断加工ではワイヤの走行速度 200~800m/min、

ワイヤにかかる最大張力 20N で使用される場合が多い。また本研究では、表 3 に示す AC サーボモータ(㈱オムロン)を使用した。そこで、モータ回転速度 3000 min^{-1} で(3.1)、(3.2)を満たすべく、ドラム半径を 50mm とした。

切断加工中、ワイヤに張力を与える必要がある。その手段として、ワイヤが巻きついている方のドラムに回転に対する負荷をかけることで張力を与えることにした。そこで、回転するドラムの軸に MC ナイロンを押し当て、負荷を与えるジグを製作した。原理を図 10(a) に示す。また、張力を容易に調節できるようにするため、図 10(b) に示すパンタグラフの機構を利用した。A 点を固定し、B 点をスライドさせることでドラム軸に対する MC ナイロンの締め付け力を調節できる。

動力伝達は図 11 に示すようにプーリとタイミングベルトを使用し、加工速度を変えられるように回転速度、トルクを容易に変更できる構造とした。なお、前述のように容易に加工を再開できるように、タイミングベルトの張力調整を行えるよう、モータをスライドさせてから固定できる機能をつけている。また、モータ自身により発生した熱によるモータの伸張による誤差動や、熱の土台への熱伝導を防止するため、モータと土台の間に 3mm ほど隙間を設け固定する機構とした。



(a) Braking for drum shaft (b) Pantograph mechanism

Fig.10 Braking system for wire loading

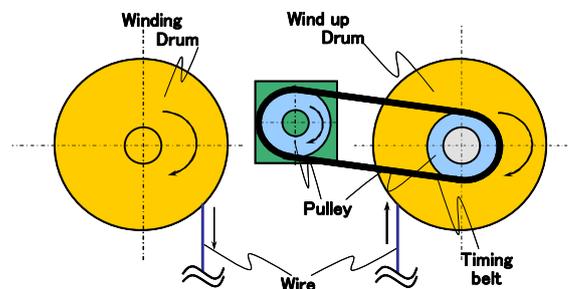


Fig.11 Power transmission and winding

製作したドラムユニットの写真を図 12 に示す。

3.5 工作物ホルダ

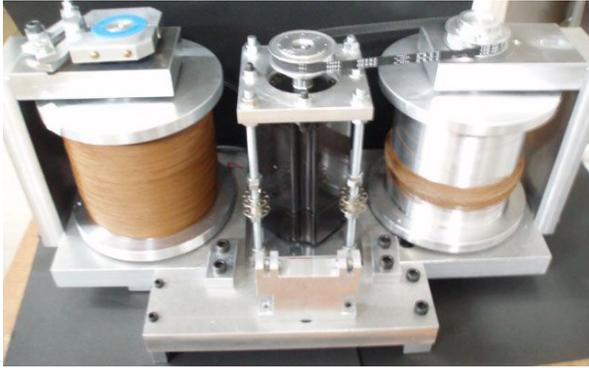


Fig.12 Picture of dram unit

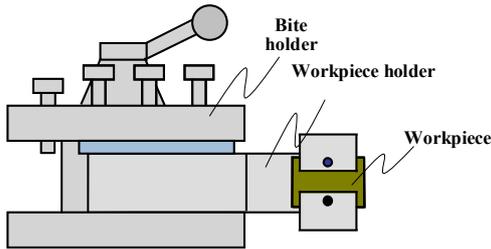


Fig.13 Workpiece holder on bite holder

旋盤の自動送り機構を利用して切断加工を行うため、図 13 に示すように工作物ホルダを製作し、刃物台に固定した。

3.6 切断加工例

製作した直動ユニットを用いて切断加工を行った。加工条件を表 3 に示す。

図 14 に加工結果の一例を示す。図 14(a)は切断加工された工作物の切断幅であり、超深度形状測定顕微鏡を使用し測定した。図 14(b)に切断部の加工写真である。図 14(a)の横軸は工作物の x 軸を表し、縦軸は工作物にレーザを当てた時反射した光の光量を表す。すなわち光量が 255 のところは工作物の表面、0 の値のところは切断加工によってできた溝部を表している。これより、切断幅が 0.28mm であることが読み取れ、目標の切断幅で加工できたことを示している。図 15 に工作物の加工後の表面を示す。表面には顕著な研削痕が見られ、びびり振動などが無いことがわかる。以上より、設計・製作した直動ユニットは、固定砥粒式ワイヤソー

Table 3 Experimental conditions

Tool	PWS
Wire running speed	30m/min
Workpiece	A5052(Thickness 2.0mm)
Feed method	Manual feed
Measurement equipment	Laser microscope (KEYENCE VK8550)

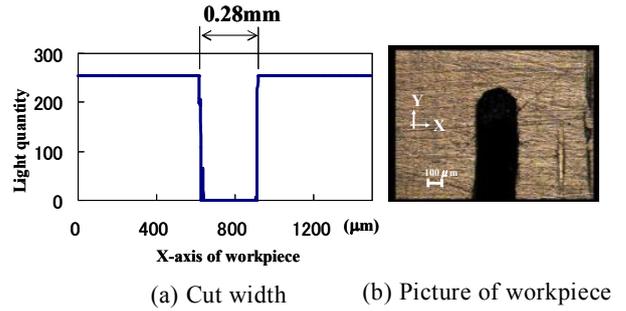


Fig.14 Example of experimental results

において十分な精度と剛性を有しており、これを首振りアームに適用することで、複雑形状を加工できると考えられる

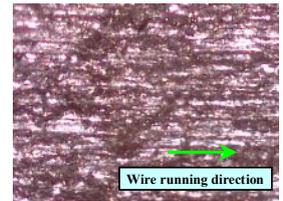


Fig.15 Cutting surface

4. 結言

非導電性材料であっても複雑な形状に、微細な切断幅で、高アスペクト・高精度加工する加工方法として、単一ワイヤを用い、切断で発生する力を常に一定方向にかかるようにする微細切断方法を提案し、首振りアーム設計・製作のための基礎データ取得を目的とした実験装置(直動ユニット)の試作とテスト加工結果について報告した。

設計・製作した直動ユニットにより加工実験した結果、平均直径 0.25mm のワイヤソーを工具に用いた切断幅は 0.28mm であり、びびり振動なども発生していなかった。すなわち、この直動ユニットは固定と粒子機ワイヤソーに十分な精度と剛性を有しており、これを首振りアームに適用することで、複雑形状を加工できることが示唆された。

謝辞

研究テーマ選定のきっかけを与えてくださいました小川心平氏、実験装置の試作にご協力いただきました教育研究支援部生産技術室の前田政継室長、野中明人技術職員、久田英樹技術職員、辻下栄技術職員、ダイヤモンドワイヤを提供いただいた(株)アライドマテリアルに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石川, 諏訪部他: 2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2005)pp.2-3
- 2) 諏訪部, 石川他: 砥粒加工学会誌, 45,8(2001) pp.381-383