

硬脆材料の延性モード切削に関する研究

●背景及び目的

ガラスは建築資材、光学部品、家電品、医療機器さらには食器に至るまで身近な工業製品に多用されている。ガラスは身近な材料であるが室温では硬く割れやすいため、機械加工が困難な代表的材料である。本研究の目標はガラスの新しい機械加工・生産方法の確立であり、本報告はガラスの延性モード切削が可能な超精密旋盤の開発とガラスの延性モード切削の応用に関するものである。

加工対象とその加工方法は、技術革新（工具・加工技術の進展）によって変化する。焼入れ鋼や金型などの高硬度材料には研削加工や放電加工が施されていたが、コーティング工具・cBN 工具の出現とマシニングセンタの性能向上により、切削による磨きレス加工が主流となった。また、ポリゴンミラー等に代表される金属鏡の製造方法は、超精密加工技術の向上と共に研削・研磨から超精密切削に移行した。しかし、ガラスレンズの場合では、球面レンズは伝統的な研磨、非球面レンズはモールド成形が主流である。ガラスなどの硬脆材料も延性モード切削加工の技術が確立すれば、金属鏡などと同様に超精密延性モード切削に移行すると考える。

●研究概要

ガラスの延性モード切削

代表的な硬脆材料であるガラス材料は、金属同様の加工方法では容易に脆性破壊を起こす。図1に示すように $0.1\mu\text{m}$ 程度といわれる延性-脆性遷移点 (dc 値) を下回る切取り厚さであれば延性モード切削が可能になるという報告は多い。図2にガラスの加工形態と加工面を示す。

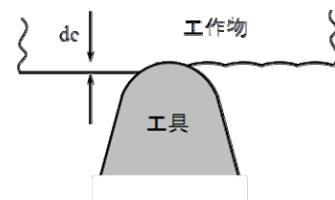
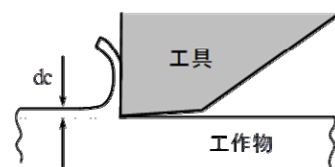


図1 切取り厚さ (dc)

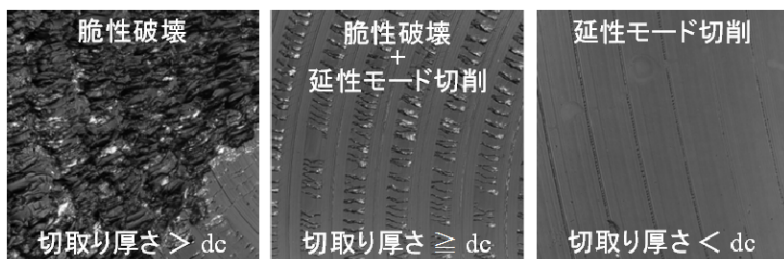


図2 ガラスの加工形態と加工面

超精密旋盤の開発

硬脆材料の超精密加工を目標に、超精密旋盤を開発した。ガラスの延性モード切削に必要な能力（静剛性、動剛性、位置決め精度、運動精度、温度安定性）と、それを実現させるために採用すべき機械構造・要素技術の組み合わせを検討・選択した。そして、開発した装置の運動精度・剛性の測定結果より、目標をほぼ達成していることを確認した。図3に開発した超精密旋盤の外観を示す。



図3 超精密旋盤の外観

旋削によるガラスの延性モード切削

開発した超精密旋盤の能力を確認するため、正面切削によるガラスの切削加工を試み、加工結果の検証を行った。結果、ガラスは延性モードで切削されていることを確認した。そして、本超精密旋盤はガラスの延性モード切削が可能な能力を有しており、採用した機械構造・要素技術の組み合わせは妥当であったことを確認した。図4にガラス加工面のSEM像と切くずのSEM像を示す。

また、旋削によるガラス切削では、以下の問題が存在する。

- 旋削によるガラスの延性モード切削は、加工能率が非常に低い非実用的な加工方法である。
- 正面切削によるガラスの延性モード切削は、弾性回復により設定した切込量と実際の加工量が異なる。そのため、ガラスの延性モード切削は、形状創成を目的とする加工には適さない。
- 単結晶ダイヤモンド工具によるガラスの切削加工では、工具摩耗が著しい。

フライカットによるガラスの延性モード切削

ガラスの高効率な切削手法として、回転工具を用いるフライカットを試みた。その実験結果を検証し、加工現象の解明を行った。図5に示すように、旋削で延性モード切削を試みると、切込み深さは d_c 値を超えることはできないが、フライカットでは切込み深さと切り取り厚さが異なるために高効率なガラス加工が可能となる。

- フライカットは旋削の100倍以上の切込み深さで延性モード切削が可能であり、加工能率の高いガラスの延性モード切削手法である。
- ガラスの切削温度を測定する手法として、加工時に放射される赤外線を計測するファイバ型放射温度計の光ファイバ（石英ガラス）を切削する手法を考案した。この手法により、石英ガラスの切削温度を測定した。
- 石英ガラス加工面のラマンスペクトル解析により、フライカットは石英ガラスの構造を変化させるほどのダメージは与えていないが、非架橋酸素空孔欠陥を生じさせていた。
- 本実験の機械構造によるフライカットでは、曲線を伴うマイクロリアクタ等の微細溝加工には適さない。図5に旋削とフライカットにおける切込み深さの比較を示す。

ダイヤモンドとガラスの摩擦摩耗実験

ガラス切削における単結晶ダイヤモンドの摩耗原因を解明する目的で、図6に示す手法によりガラス円盤と単結晶ダイヤモンド角柱の摩擦摩耗実験を行った。実験結果を検証し、ダイヤモンド工具の摩耗原因の解明を行った。図7に実験結果の一例として、摩擦面のラマン解析結果を示す。赤線は摩擦面のラマンスペクトルでグラファイトであることが分かり、青線は非接触面のラマンスペクトルでガラスのスペクトルとなっている。

- 本実験では、単結晶ダイヤモンドの摩耗原因は機械的作用ではない。
- 単結晶ダイヤモンドの摩耗量は結晶方向に依存し、摩擦熱の増加する傾向と一致する。
- 単結晶ダイヤモンドは摩擦によりグラファイト化し、摩耗している。このグラファイト化は、摩擦熱だけが原因ではない。
- 単結晶ダイヤモンドとガラスの摩擦部分は発光し、プラズマが発生している。このプラズマは、ダイヤモンドのグラファイト化またはエッチングによる摩耗を促進していると考えられる。

●結論

ガラスの新しい機械加工・生産方法の確立を目指した研究より、以下の結論を得た。

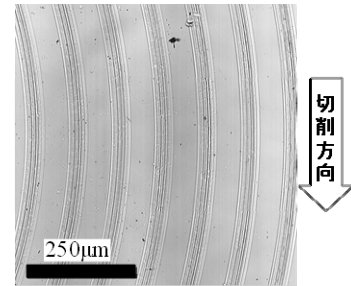


図4(a) ガラス加工面のSEM像

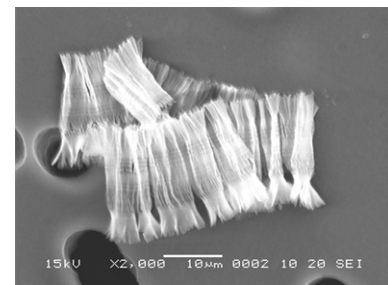


図4(b) 切くずのSEM像

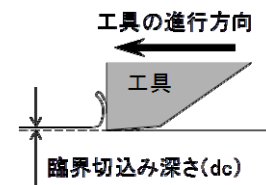


図5(a) 旋削による臨界切込み深さ

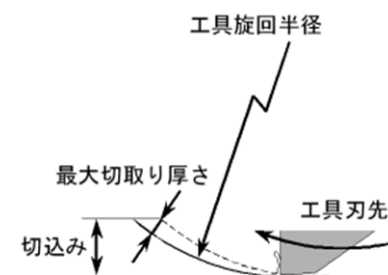


図5(b) フライカットによる切込み深さ

- ・ ガラスの延性モード切削が可能な超精密旋盤は、適切な機械構造・要素技術の採用により、技能に頼らず開発可能である。
- ・ 旋削によるガラスの延性モード切削は、低い加工能率とガラスの弾性回復のため形状創成加工には適さない。
- ・ フライカットは実用的なガラスの延性モード加工の手法である。
- ・ 単結晶ダイヤモンドはガラスとの摩擦によってグラファイト化し、摩耗する。摩耗原因は摩擦熱だけではなく、プラズマも影響を与えている。

●主要な実績（関連論文等）

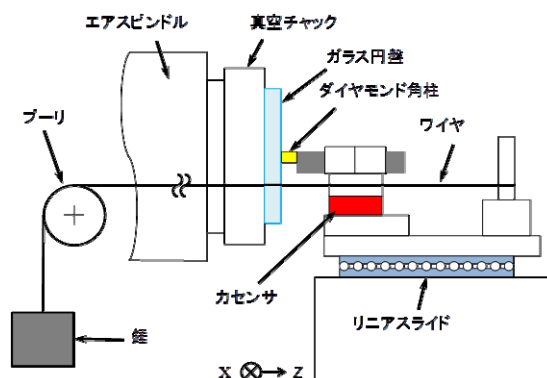


図6 ガラスの摩擦摩耗実験（模式図）

投稿論文

- 1) 飯塚 保, 畠山 実, 上野 滋, 森田 昇: 硬脆材料の超精密加工を可能とする超精密旋盤の開発, 砥粒加工学会誌, 56 (8), 552-559, 2012-08
- 2) 飯塚 保, 森田 昇, 山口 誠, 上野 滋: 光学ガラスと単結晶ダイヤモンドの摩擦摩耗特性, 砥粒加工学会誌, 57 (3), 181-185, 2013-03

国際会議 (Proceedings)

- 1) The 6th ICOMM (International Conference on Micromanufacturing)
T. Iizuka, M. Yamaguchi, S. Ueno and N. Morita : Ductile-mode Cutting of Glass by Fly Cutting, 2011, 3, 10
- 2) LEM21 (The 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century)
T. IIZUKA, Y. MURATA, M. YAMAGUCHI, S. UENO, N. TAKATSUJI and N. MOITA : Sliding wear characteristics of single crystal diamond against optical glass, 2011, 11, 10

学会誌 解説記事

- 1) 飯塚 保: ガラスの延性モード切削加工技術, 砥粒加工学会誌, 52 (11), 634-637, 2008-11-01

商業誌 短期連載

- 1) 飯塚 保: 超精密旋盤によるガラスの延性切削に関する研究, 工業調査会, 機械と工具, 2006, 8月号~10月号

技研所報

- 1) 飯塚 保: 硬脆材料の超精密加工を可能とする超精密旋盤の開発とガラスの延性モード切削への応用に関する研究, Vol. 49, No. 1 (145)

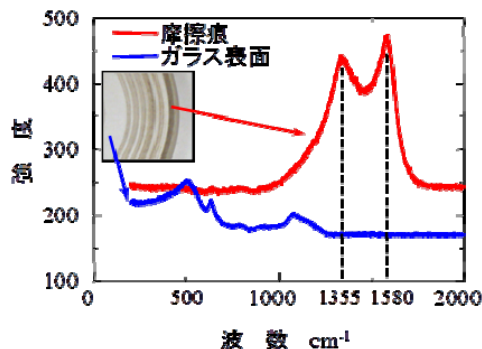


図7 ガラスの摩擦面のラマンスペクトル

お問い合わせ先: 技術開発センター (担当: 飯塚 保)
TEL: 042-475-1188 FAX: 042-474-1980
iizuka@tri.jspmi.or.jp

