

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01230

研究課題名（和文）SiC金型切削とナノ構造形成およびグラフェン成膜による高性能ガラス光学素子成形

研究課題名（英文）SiC mold cutting, LIPSS formation, and graphene coating for high-performance glass optics

研究代表者

閻 紀旺（Yan, Jiwang）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：40323042

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：スローツールサーボ（STS）を用いて反応焼結SiCなどを基板とするマイクロレンズアレイ金型の切削を行い、基本加工特性を解明し、工具と工作物の間欠接触により刃先の冷却効率を向上させ、工具摩耗を抑制する方法を提案した。また、フェムト秒パルスレーザーを用いて金型表面へのLIPSS（レーザー誘起ナノ周期構造）を形成させ、さらにグラフェン成膜を行い、そのLIPSS形成メカニズムやナノグラファイト成膜特性を解明した。最終的に、試作した金型を用いてガラスマイクロレンズアレイのガラスプレス成形実験を行い、成形機構や界面現象を調べ、最適な成形条件の解明を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、ガラスを基板とするマイクロレンズアレイの高精度プレス成形が可能となり、ガラス光学素子の量産の可能性が示された。この研究成果は多岐にわたるガラス製品へ適用可能であり、ものづくり産業への波及効果大きい。特に近年のスマートフォンやVR、AR、車載ヘッドアップディスプレイ、光通信装置、医療デバイスなどの光学系で需要が増加しているマイクロレンズアレイの製造技術に大きく寄与すると考えられる。また、本研究によってガラス・金型の界面で発生する機械的、物理的、化学的現象を実験的および解析的手法により解明し、金型および離型膜の設計や成形プロセスの最適化などにも貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Reaction-bonded silicon carbide (SiC) was used as a mold material for press molding of glass micro lens arrays. An ultraprecision machine tool equipped with a slow tool servo system was used for cutting the micro lens array structures on the mold surface, and a femtosecond pulsed laser was used to generate periodical surface nanostructures (LIPSS) on the mold surface. Then, a nano-graphite thin film was coated on the mold surface as a mold release coating by using the air-pressure CVD method. The fabricated molds were used for high-precision glass lens molding experiments, and the interfacial phenomena between the glass component and the mold were clarified and the molded glass components were evaluated. It was demonstrated that the proposed methods for mold fabrication and surface processing was effective for micro lens array manufacturing.

研究分野：生産加工学

キーワード：ガラス成形 超硬合金 金型加工 グラフェン成膜 超精密切削 反応焼結SiC ナノ周期構造 マイクロレンズアレイ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、スマートフォンやVR, AR, 車載ヘッドアップディスプレイ, 光通信装置, 医療デバイスなどの光学系では、マイクロレンズアレイに対する需要が増加している。マイクロレンズアレイとは、マイクロメートル単位の大きさのレンズが連続して配置された光学レンズである。また、光学性能や耐久性向上のため、近年レンズ材料が樹脂からガラスへと移行しつつある。ガラスは射出成形が不可能であり、切削や研削などによるガラスマイクロレンズアレイの直接加工も困難である。そのため、高温プレス成形技術を用いたガラスマイクロレンズアレイ製作の可能性検証が急務となっている。高温ガラスプレス成形では、金型製作が鍵となる。これまでの大型ガラスレンズの成形には超硬合金金型が使用されているが、超硬合金の高温劣化が指摘されており、反応焼結 SiC などより高耐久性の金型材料の探索も求められている<sup>1)</sup>。また、金型は現在主に研削・研磨によって加工が行われているが、マイクロレンズアレイのような微細形状金型の研削・研磨は空間的な制約から実現が困難であり、課題が多く残されている<sup>2)</sup>。ガラスレンズのプレス成形においてももう1つの鍵は離型膜である。ガラス融着を防ぎ、離型を容易にするために金型表面へレアメタルや DLC 薄膜を形成させる必要があるが、高温プレス中に離型膜の剥離が頻繁に起きるため、成形プロセスを中断し金型表面への再成膜が余儀なくされる<sup>3)</sup>。この問題は特に大面積マイクロレンズアレイの成形において顕著になり、生産性を阻害する最難関である。

### 2. 研究の目的

本研究では、ガラス製マイクロレンズアレイや各種の微細構造表面の高精度創成を可能にするため、スローツールサーボ (STS) 援用分割切削を用いて単結晶 Si や超硬合金そして反応焼結 SiC 金型の超精密加工を行い、切削面へフェムト秒レーザーを照射することによって表面ナノ周期構造 (LIPSS) を形成させ、さらに LIPSS 表面へグラフェン膜をコーティングすることによって高精度・長寿命かつ離型性の優れた金型を製作することを研究目的としている。

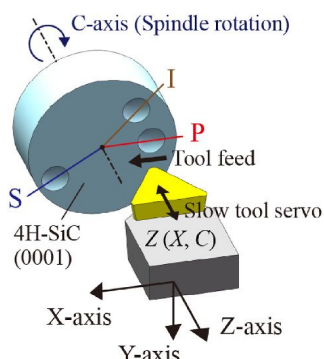
### 3. 研究の方法

STS 搭載の多軸同時制御の超精密加工機を用いて、単結晶シリコン (Si), 超硬合金と反応焼結 SiC を基板とするマイクロレンズアレイ金型の切削を行い、基本加工特性を解明し、工具と工作物の間欠接触により刃先の冷却効率を向上させ工具摩耗を抑制する方法を検討する。また、金型表面への LIPSS 形成とグラフェン成膜を行い、その形成メカニズムや成膜特性の究明を行う。さらに、LIPSS 形成とグラフェン成膜を行った金型を用いてガラスマイクロレンズアレイの成形を行い、成形機構や界面現象を調べ、最適な成形条件の解明を行う。具体的には、開発した金型を用いてガラスのプレス成形実験を行い、マイクロレンズアレイ形状の転写精度を計測し、プレス成形メカニズムの解明を試みる。さらに成形過程におけるガラスとグラフェン膜と表面形態変化について観察と分析を行い、ガラス・グラフェン膜・金型基材間の界面現象を調査する。最終的に界面構造の最適化によって、離型力の低減と金型の長寿命化を達成する。

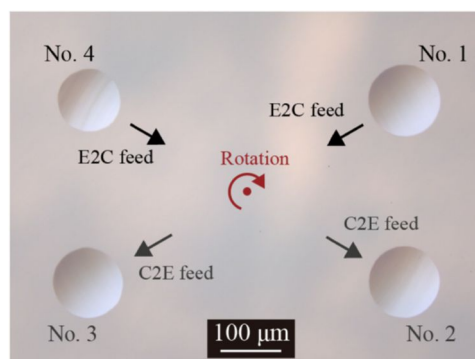
### 4. 研究成果

#### (1) マイクロレンズアレイ金型の切削加工

STS 制御可能な多軸超精密加工機を用いて反応焼結 SiC や単結晶 SiC, 超硬合金などを基板とするマイクロレンズアレイ金型の切削を行い、基本加工特性の解明を行った。ツールパスの最適化を行うことにより、加工機の追従誤差を 10 nm レベルまで低減させ、また、工具と工作物の間欠接触により刃先の冷却効率を向上させ、工具摩耗を抑制する方法を見出した。図 1 に、マイクロレンズアレイの加工模式図および単結晶 SiC 表面に加工したマイクロレンズアレイの光学顕微鏡写真を示す。表面粗さ 3 nm Sa, 形状精度 27 nm の加工が実現できた。



(a) マイクロレンズアレイ切削方法



(b) 単結晶 SiC 表面への加工例

図 1 STS によるマイクロレンズアレイ金型の切削加工

## (2) 金型表面への LIPSS 形成

図 2 に、フェムト秒パルスレーザーを用いて反応焼結 SiC の表面に形成した LIPSS の走査型電子顕微鏡画像を示す。SiC 領域と Si バインダー領域における LIPSS の生成形態に差異が見られ、異なるレーザー走査方向と偏光方向で形成した LIPSS の幅や深さの均一性にも違いが観察されているが、いずれも金型離型性の向上に寄与する範囲内にあることが確認できた。

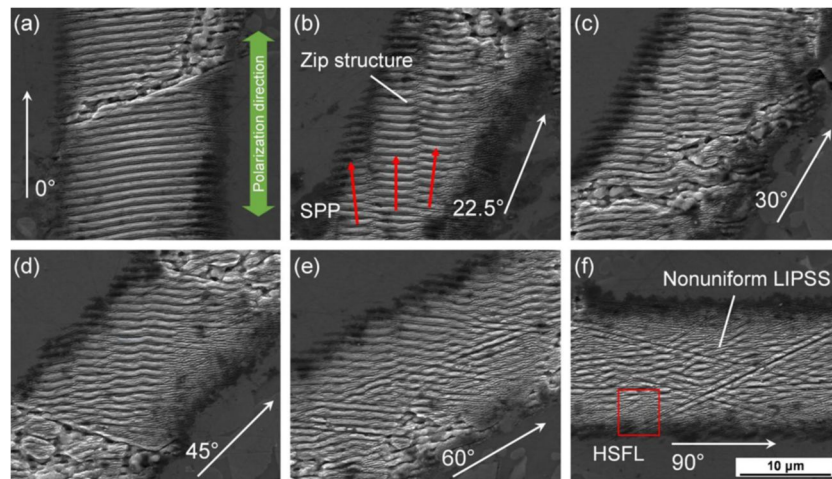


図 2 異なるレーザー走査方向と偏光方向で形成した SiC 表面の LIPSS

## (3) 金型表面へのグラフェン成膜

常圧 CVD 法によって、LIPSS が形成された各種の金型表面へグラフェン成膜を試みた。その結果、単層から数層のグラフェン成膜が困難であり、膜厚が約 20 nm 以上の厚い炭素膜（ここでナノグラファイトと呼ぶことにする）が形成されることが確認できた。図 3 に、異なる成膜時間 ((a) 5 min, (b) 15 min) で形成した Si 表面のナノグラファイト薄膜の断面透過電子顕微鏡 (TEM) 像を示す。厚さ 40nm ~ 80nm のナノグラファイト膜が形成されたことがわかる。

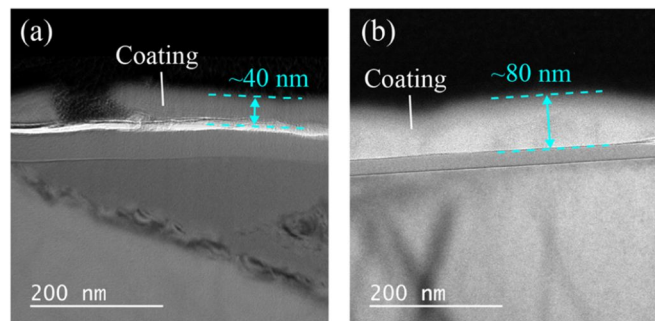


図 3 異なる成膜時間で形成した Si 表面のナノグラファイト薄膜の断面 TEM 像

## (4) ガラスマイクロレンズアレイのプレス成形

試作した金型を用いて高精度ガラスプレス成型機によりガラス基板へマイクロレンズアレイの転写を試みた。その結果、形状精度の高いマイクロレンズアレイを製作することが可能であり、本研究で提案した金型加工と表面処理の一連の方法が有効であることを確認した。また、マイクロレンズアレイの透過率や屈折率の評価そして結像画質の測定についても行った。

### 参考文献

- (1) Itoh, T., Tanaka, S., Jing-Feng, L., Watanabe, R., Esashi, M., 2006, Silicon-carbide microfabrication by silicon lost molding for glass-press molds, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 15 (4): 859-863.
- (2) Beaucamp, A., Namba, Y., Combrinck, H., Charlton, P., Freeman, R., 2014, Shape adaptive grinding of CVD silicon carbide, *CIRP Annals*, 63 (1): 317-320.
- (3) J. Masuda, J. Yan, T. Zhou, T. Kuriyagawa, and Y. Fukase: Thermally-induced atomic diffusion at the interface between release agent coating and mould substrate in a glass moulding press, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44 (2011) 215302.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

|  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Tushar Meshram, Jiwang Yan   | 4. 巻<br>6:4              |
| 2. 論文標題<br>Formation of Laser-Induced Periodic Surface Structures on Reaction-Bonded Silicon Carbide by Femtosecond Pulsed Laser Irradiation | 5. 発行年<br>2023年          |
| 3. 雑誌名<br>Nanomanufacturing and Metrology  | 6. 最初と最後の頁<br>1-13       |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1007/s41871-023-00184-8  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>-                |
| 1. 著者名<br>Lin ZHANG, Yusuke SATO and Jiwang YAN  | 4. 巻<br>17               |
| 2. 論文標題<br>Optimization of fast tool servo diamond turning for enhancing geometrical accuracy and surface quality of freeform optics         | 5. 発行年<br>2023年          |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing  | 6. 最初と最後の頁<br>1-14       |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1299/jamdsm.2023jamdsm0012   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                |
| 1. 著者名<br>Lin Zhang, Jiwang Yan  | 4. 巻<br>448              |
| 2. 論文標題<br>Study on nano-graphitic carbon coating on Si mold insert for precision glass molding  | 5. 発行年<br>2022年          |
| 3. 雑誌名<br>Surface & Coatings Technology  | 6. 最初と最後の頁<br>128893     |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.surfcoat.2022.128893  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                |
| 1. 著者名<br>Yusuke Sato and Jiwang Yan   | 4. 巻<br>4                |
| 2. 論文標題<br>Tool path generation and optimization for freeform surface diamond turning based on an independently controlled fast tool servo   | 5. 発行年<br>2022年          |
| 3. 雑誌名<br>International Journal of Extreme Manufacturing   | 6. 最初と最後の頁<br>No. 025102 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1088/2631-7990/ac5f12  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>該当する             |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yusuke Sato and Jiwang Yan  |
| 2. 発表標題<br>Tool path generation and optimization for diamond turning based on independently controlled fast tool servo |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会)                       |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Jiwang Yan   |
| 2. 発表標題<br>Multiscale surface structuring of hard brittle materials         |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Nanomanufacturing 2021 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|