

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04127

研究課題名（和文）プラスチック樹脂射出成形用の金型材料に対する超精密切削による高機能性表面の創成

研究課題名（英文）Fabrication of functional surface by ultra-precision cutting of mold materials for plastic injection molding

研究代表者

坂本 重彦（Sakamoto, Shigehiko）

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：00315285

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：オーステナイトステンレス鋼SUS304に対して、切込み量を小さくし、低速加工を行うバニシング仕上げ加工が、加工仕上げ面にマルテンサイト相を構築して表面硬度を上げられることがわかった。加工表面層の性状を確認すると、オーステナイト相がマルテンサイト相に変態していることを確認した。バニシング超精密切削加工を実施することは、さらに高精度な加工仕上げ面を創成することに留まらず、高機能な硬度仕上げ面を構築する加工技術につながると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バニシング仕上げ加工ではMQLによる圧縮空気を供給して加工していたため、加工中の温度上昇による影響よりも、機械的な応力による加工誘起マルテンサイト変態が生じたと推察される。工具姿勢を任意に変えることができる5軸マシニングセンタでの加工において、微小切り込みによる高精度な加工仕上げ面を創成することは、機能性表面を生成して高強度かつ耐腐食性の優れた製品づくりに役立てられる。立方体に異なる姿勢で切削加工を行うキューブ加工を実施することで、加工面への影響を評価することも可能と言える。

研究成果の概要（英文）：For austenitic stainless steel SUS304, it was found that burnishing finish machining, in which the depth of cut is reduced and low speed machining is performed, can build up martensitic phase on the machined finished surface and increase surface hardness. The properties of the machined surface layer confirmed that the austenite phase transformed to martensite phase. It is considered that the vanishing ultra-precision machining will lead not only to the creation of a more precise machined surface finish, but also to a machining technology to construct a high-functional hardened surface finish.

研究分野：生産加工・工作機械

キーワード：バニシング加工 ステンレス鋼 マルテンサイト変態 高硬度 キューブ加工

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 射出成形用の金型は、プラスチック製品の性能や性質に大きく影響を及ぼす。金型の形状精度や仕上げ面精度が、製品にそのまま転写される。金型の長寿命化は、低コスト生産につながる。国内でのプラスチック樹脂の射出成形製品の国際競争力を高めるためには、金型の高精度に加えて、耐摩耗性や耐腐蝕性を持たせることが必須の技術である。

(2) 鉄系材料の超精密切削において、超音波振動装置を用いたダイヤモンド工具による振動加工が広く普及している。切削抵抗を低減させることを原理として優れた手法である一方、振動を伴うため超精密切削において活用に繊細さが要求されている。本研究では、ダイヤモンド工具に代わる超精密切削用工具として、高精度に研磨・整形した超硬工具を母材として、チタン系 PVD 皮膜を施した超硬コーティング工具を開発していく。ダイヤモンド工具に比較して安価となる超硬コーティング工具を用いることで、低コスト化を実現できる。この結果、難削材として鉄系材料であり、プラスチック樹脂の射出成形用金型材料などのステンレス鋼や焼入れ鋼に対して、新たな被削性を実験的に明らかにする。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、プラスチック樹脂内で強化ファイバーの分散化を目指した射出成形用金型加工を目指す。そのため、射出成形におけるプラスチック樹脂の流れをスムーズにする金型の表面を創成し、さらに耐摩耗性、耐腐食性、超平滑面精度など高機能性を持たせる。プラスチックの射出成形に使われる金型材料として、マルテンサイト系ステンレス鋼、例えば SUS420J2 の焼入れ鋼を対象に、超精密切削で平滑面を創成する。

(2) ステンレス鋼の加工において、切削油剤による Fe リッチの環境を作ることが、仕上げ面の不動態化を促進するであろうと考え、耐腐食性を高めることにつなげたい。さらに、パニッシュ加工となる切り込み量ほぼゼロの超精密切削で、マルテンサイト誘起変態などの加工硬化も狙う。不動態化と加工硬化のメカニズムを明らかにする。安定した、コンベンショナルな超精密切削による難削材の加工法は、広い面積の加工を可能として、金型加工を実現するであろう。高額で特殊な装置を必要としないことは、切削理論の原則に基づき、多くの製造業において有益な知見となりうる。

### 3. 研究の方法

(1) オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 および 316 に比較して、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS420J2 の超精密切削を行う。各種の切削油剤を用いて、ミスト供給の油剤量、供給点の数や方向、液体窒素による還元環境下での実験など超精密旋盤でナノメートル・オーダーの仕上げ面創成を行い、研究室所有の各種顕微鏡で観察する。得られた仕上げ面の成分分析も行い、不動態層を定量的に評価するとともに、硬度試験での仕上げ面の性状を評価する。

(2) 金型加工において、5 面や自由曲面を加工できる 5 軸制御マシニングセンタでは、任意の工具姿勢を取ることができ、送り案内軸の同時制御が高精度化の鍵となる。様々な工具姿勢によるエンドミル工具で立方体の 5 面に切削面を創成するキューブ加工を提案する。工具姿勢の変化によって、工具案内軸間の誤差および位置決め誤差による影響が反映され、加工面に高低差が生じるシミュレーションを行う。僅かな高低差が生じることで、9 つの正方形が創成され、ルービックキューブのような模様ができる。これら加工面の高低差および傾きを計測して、加工面精度を評価する。

#### 4. 研究成果

(1) ビッカース硬さ試験方法(JIS Z 2244:2009)で測定した母材硬度として、SUS316は159HV、SUS304は163HVとなった。エンドミル工具の半径方向に切込量  $Rd=5\mu\text{m}$  の微小切込みを与えるバニシング加工で、図1のように被削材表面の表面粗さ向上と同時に、表面改質を行った。

切削速度  $Vc=20\text{m/min}$ 、1刃当たりの送り量  $f=2\mu\text{m/tooth}$ 、半径方向切込み  $Rd=5\mu\text{m}$  で加工した表面の硬度は469HVまで上昇し、表面の結晶構造はオーステナイト組織とマルテンサイト組織が存在した。

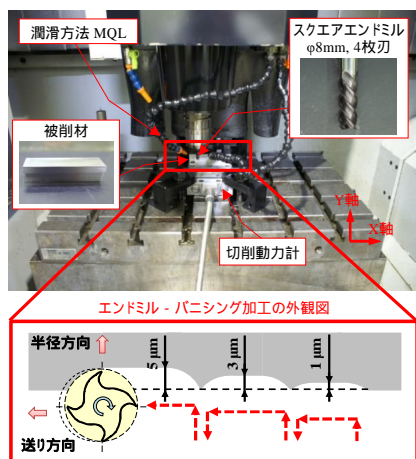


図1 実験装置および加工法

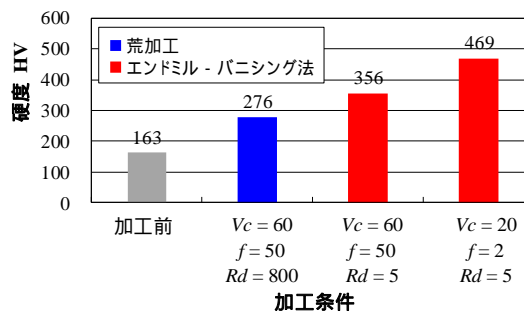


図2 各種加工条件での硬度変化

(2) エンドミル-バニシング加工における1刃当たりの送り量変更時のマルテンサイト比率について検討した。半径方向切込み量  $Rd=5\mu\text{m}$ 、1刃当たりの送り量  $f=5, 10, 20, 30, 40, 50, 60\mu\text{m/tooth}$  の6条件変化させた時、図2のように切り厚さが変化する。最大切り厚さが1mm以下の時、図3のようにマルテンサイト比率が急激に上昇することを確認した。

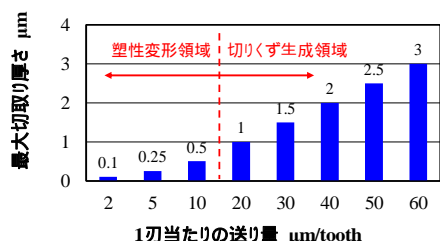


図3 最大切り厚さと送り量の関係

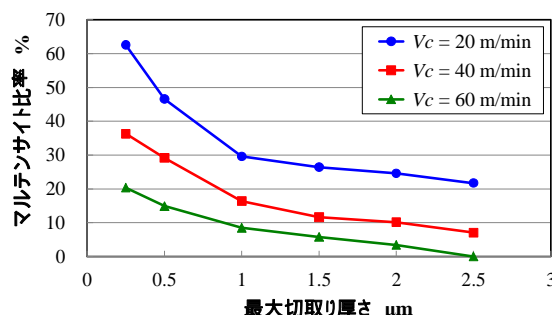


図4 マルテンサイト比率と切り厚さの関係

(3) 金型加工における自由曲面を創成するために、エンドミル工具の姿勢を変化させる必要がある。5軸マシニングセンタにて工具姿勢を変化させたとき、機械精度が及ぼす加工精度への影響を検証するためにキューブ加工を提案した。同一の切り込み量を与えているが、加工面には高低差が生じている。加工面への切り込み量が変化するため、加工面性状も差異を生じると推察される。

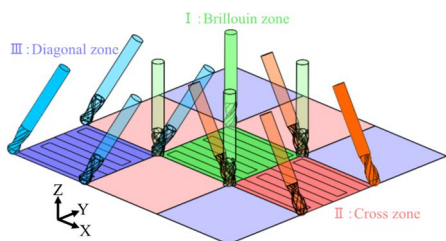


図5 キューブ加工での工具姿勢の一例

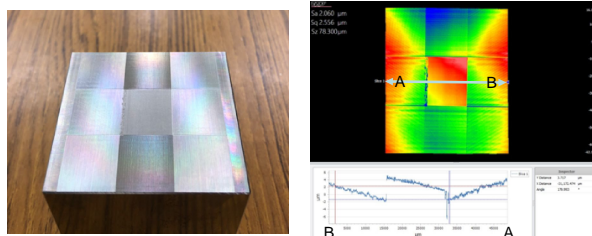


図6 キューブ加工面および表面性状

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zongze LI, Ryuta SATO, Keiichi SHIRASE, Shigehiko SAKAMOTO	4. 巻 71
2. 論文標題 Study on the influence of geometric errors in rotary axes on cubic-machining test considering the workpiece coordinate system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 36-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Shigehiko SAKAMOTO, Atsushi YOKOYAMA, Kazumasa NAKAYASU, Toshihiro SUZUKI, Shinji KOIKE, Ryuta SATO
2. 発表標題 Accuracy evaluation method on the five-axis machining centers by Square 3x3 machining
3. 学会等名 Proceedings of the 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zongze LI, Ryuta SATO, Keiichi SHIRASE, Shigehiko SAKAMOTO
2. 発表標題 Simulation of Cubic-machining Tests by Five-axis Machining Center with the Consideration of Workpiece Coordinate System
3. 学会等名 Proceedings of the 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shigehiko SAKAMOTO, Atsushi YOKOYAMA, Kazumasa NAKAYASU, Toshihiro SUZUKI, Shinji KOIKE
2. 発表標題 Error Analysis By Square 3X3 Machining Method For Five-Axis Machining Centers
3. 学会等名 Proceedings of the JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing (LEMP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂本重彦、鈴木敏弘、中安和正
2. 発表標題 正方形3x3加工法による5軸マシニングセンタの精度評価に関する研究
3. 学会等名 2020年度 精密工学会 春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂本重彦、横山惇史、宮下宗仁、宮野雅之、鈴木敏弘、小池伸二
2. 発表標題 多軸制御工作機械の同軸度に関する定義法
3. 学会等名 2019年度 精密工学会中国四国支部・九州支部 佐世保地方講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigehiko Sakamoto, Toshihiro Suzuki, Kazumasa Nakayasu and Shinji Koike
2. 発表標題 Square 3x3 machining method for accuracy evaluation of five-axis machining centers
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本 重彦、長野 広明、宮下 宗仁、宮野 雅之、鈴木 敏弘、小池 伸二
2. 発表標題 多軸マシニングセンタにおけるロータリテーブルの組立誤差に関する精度解析
3. 学会等名 日本機械学会第 13 回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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
---------	---------