

超音波遊離砥粒加工の自動化に向けた SiC の加工特性解析

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 柿沼研究室 所属 ○飯沼直輝, ©柿沼康弘

要旨

超音波遊離砥粒加工は複合材料などの高機能材料の加工法として注目を集めている。一方、研究例が少なくパラメータの定量的な評価が十分に行われておらず、また加工の大半を手作業で行っているという課題がある。そこで本研究では分散分析を用いて加工圧、出力、流量の3つのパラメータが加工に与える影響を評価した。また、適切なタイミングで砥粒循環を促すためのステップフィードを適応制御する技術を開発し、その評価を行った。

1. 結論

CMCをはじめとする複合材料が高い機能性を持つ材料として注目を集めているが、一方で切削などの従来の方法では加工が困難であるという課題がある。

超音波遊離砥粒加工(以下、超音波加工とよぶ)は硬脆材料として知られる複合材料の加工法に適していることから注目を集めている¹⁾。しかしこの加工法に関する研究は十分に行われておらず、パラメータの定量的な評価が行われていないほか、加工の大半が人手によって行われている。本研究では代表的な3つのパラメータについて分散分析による特性評価を行い、モノリシック SiC を対象とした場合の加工能率を高める条件を検討した。そして、得られた結果をもとに工具の自動ステップフィード加工システムを開発しその評価を行った。

2. 加工特性解析および自動化へ向けた提案

分散分析はデータのばらつきを因子変化に起因する変動と誤差に起因する変動とに分け、その比を取ることによって因子による効果の有意差判定を行う方法である。このとき変動の比として得られる F 比は帰無仮説の下で F 分布に従うことが知られている。なお、帰無仮説とは「因子間の有意差はない」とするものである。このとき、データから得られた F 比が有意水準 α において F 分布から得られる値である F_{α} を超える場合には、帰無仮説は棄却域に含まれることとなるため棄却される。このとき、対立仮説である「因子間の有意差を認める」とする結論が導出される。図1に変動の分離に関する概略を示す。

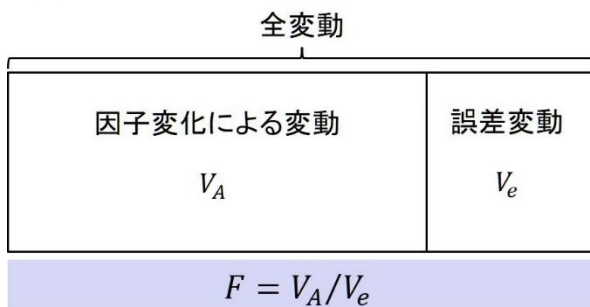


図1 変動の分解に関する概略

本研究では超音波加工における代表的な3つのパラメータである、工具を被削材方向へ送るための負荷となる加工圧、工具振幅と比例関係にある出力、砥粒の供給量を決定するスラリー流量の3つを挙げ、これらが加工能率に及ぼす影響の大きさを判定するとともに最適な水準の組み合わせを明らかにする。分散分析は機械加工分野をはじめとする様々な分野において用いられており²⁾、本研究における適用にも有効であることが期待される。

また、自動ステップフィード加工システムとして PLC 装置および加工量測定のための深さセンサを用いてエアシリンダを制御し、加工量や能率に応じて工具を上下させるシステムを開発した。その概要を図2に示す。このシステムの性能向上を目的に、本研究

では能率の閾値などのパラメータを評価した。

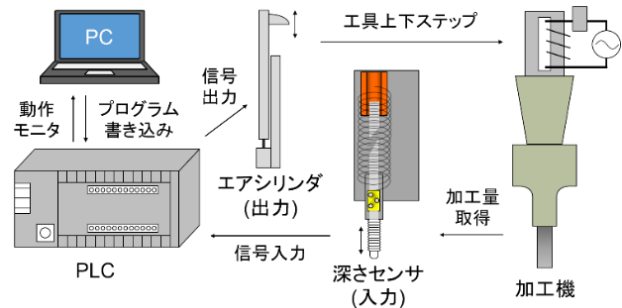


図2 自動ステップフィードシステム概要

3. 実験方法

まず、本研究における実際の加工域および被削材の様子を図3に示す。超音波振動する工具の形状が被削材表面に転写される形で溝加工が進展する仕組みである。

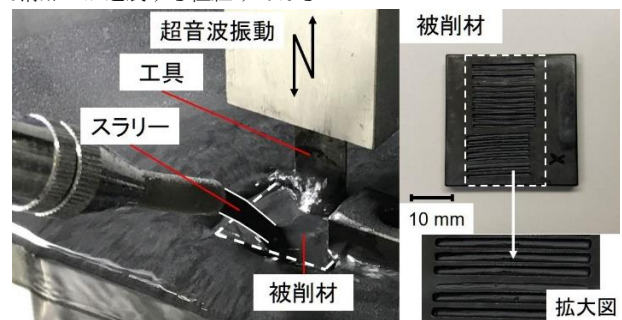


図3 加工域および被削材の様子

分散分析による因子の有意性判定を行うため、表1に示す3因子3水準の三元配置について、繰り返し数3回の乱塊法による総当たりの実験を行った。この時、ステップフィードは行わず90秒間の加工を行い、その加工量を特性値として分散分析を行った。

表1 因子・水準の設定値

因子	水準1	水準2	水準3
A:加工圧 [g/mm ²]	85.3	238.8	417.9
B:出力 [W]	60	80	100
C:流量 [mL/min]	1000	2500	4000

自動ステップフィード加工システムに関する実験では、加工能率に応じたステップフィード加工を行うシステムについて、その閾値を0.5 $\mu\text{m/s}$ 、2.0 $\mu\text{m/s}$ 、5.0 $\mu\text{m/s}$ の3通り設定し、5分間の加工をそれぞれ6回ずつ行い、最終的な加工量および加工量と加工能率の時間変化の様子から評価を行った。

また、表2に本実験における共通条件を示す。

表 2 本実験における共通条件

超音波周波数 [kHz]	16
被削材材質	モノリシック SiC
被削材寸法 [mm]	30×30×4
工具材質	SK 材
砥粒材質	B ₄ C
平均砥粒径 [μm]	29
スラリー溶媒	水

4. 実験結果

分散分析の結果、3つの因子は全て非常に大きな有意性を持つことがわかった。実験により得られた要因効果図を図4に示す。これに加え加工圧に関する追加実験を行うことにより、加工圧100.0 g/mm²、出力100 W、流量2500 mL/minが加工能率を最大化させる水準であるとわかった。

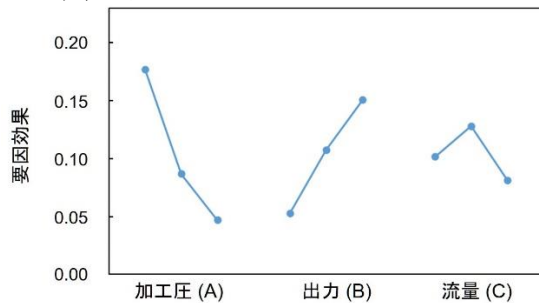


図4 加工圧、出力、流量に関する要因効果図

このほか、加工圧と出力、加工圧と流量における交互作用にも有意性があることが示された。このときのそれぞれの要因効果図を図5に示す。このとき、どちらの交互作用もそれぞれの要因効果が最大となる水準において相乗的に要因効果、つまり加工能率が高くなっていることが確認された。

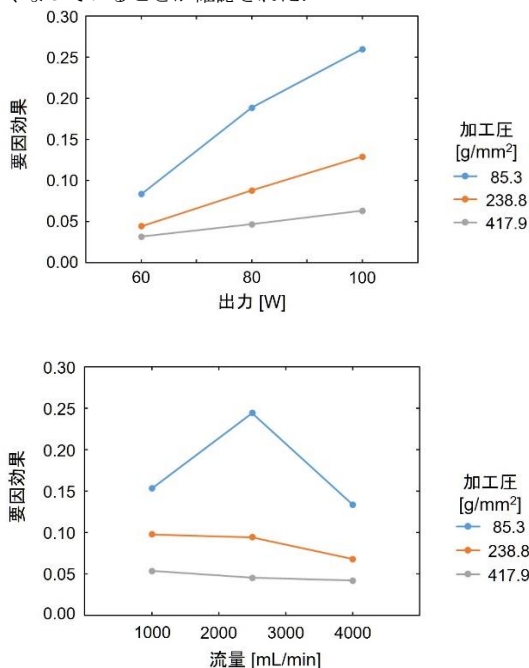


図5 交互作用(上:加工圧-出力間, 下:加工圧-流量間)

交互作用に有意差が生じる際、一方の因子の水準変化に伴って他方の因子の効果が逆転する場合には、最適な水準を選定するにあたって注意が必要となるが、今回の結果については最適な水準の組み合わせのもとで効果が相乗的に増大するため、図4より得

られる最適な水準の組み合わせが高効率な実験結果を得ることができる条件であるといえる。

また、自動ステップフィード加工システムに関する実験として能率判定に用いた閾値の評価を行ったところ、0.5 μm/sにおける加工量が他の能率に比べておよそ20%加工量を上昇させることがわかった。図6にこの結果を示す。また、図7に示すように、閾値が2.0 μm/s以上の場合にはステップ後の能率が閾値に届かない場合が多く、閾値として適切ではないことがわかった。これらを踏まえ、評価した加工能率の中では0.5 μm/sが本システムにおける閾値として適切であることを確認した。

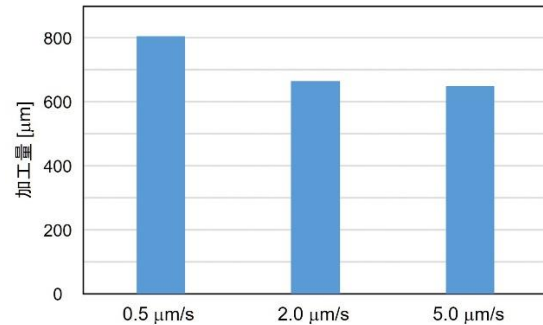


図6 各閾値での加工終了後の加工量

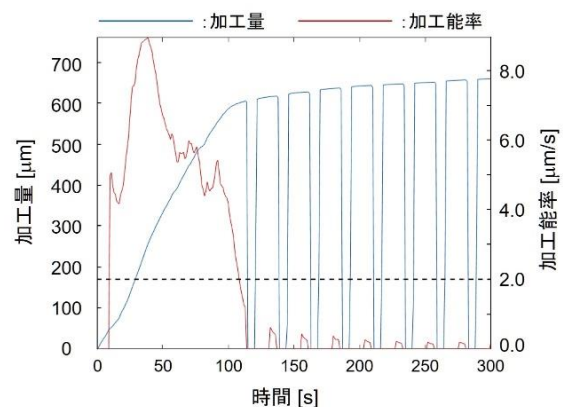


図7 閾値2.0 μm/sでの加工量と能率の時間変化

5. 結論

本研究では超音波加工の分散分析による加工特性解析と自動ステップフィード加工システムの構築を行った。分散分析の結果、全ての因子が有意性をもつことがわかったほか、交互作用の有意性も確認された。これらの結果をもとに加工能率を最大にする水準を定量的に評価することができた。また、自動ステップフィード加工システムを構築し、性能向上のために加工能率の閾値を例とするパラメータについて評価を行った。

6. 参考文献

- [1] 浅見拓哉, 超音波振動を利用した加工技術, 日本音響学会誌, 74, 4, (2018), 219-226
- [2] B. Savkovic, Optimization of Machining Parameters Using the Taguchi and ANOVA Analysis in the Face Milling of Aluminum Alloys AL7075, Tenickl vjesnik, 27, 4, (2020), 1221-1228

謝辞

本研究は株式会社 IHI の佐藤弘茂様、白田稜様をはじめとする社員の方々のご協力の下行われました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。