

令和 4 年 5 月 11 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04134

研究課題名（和文）摩擦攪拌プロセスによる改質部の切削性および難削性発現機構

研究課題名（英文）Machinability and mechanism of cutting difficulties in materials with surface modified by friction stir processing

研究代表者

生田 明彦（Ikuta, Akihiko）

近畿大学・工学部・教授

研究者番号：70330321

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：摩擦攪拌プロセス（FSP）を行った材料表面切削中の切削抵抗や切削後の表面性状に着目し、FSPによる単純な攪拌での改質部と硬質粉末材料を分散させた改質部とを比較検討した。

その結果、FSPによる表面改質部の切削性は、単純な攪拌での改質か硬質粉末材料を分散させた改質部かによらず、基地部の影響が大きく作用するため、基地部自体の特性を大きく変化させない限り、あまり影響を受けないことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、検討がほとんど行われていないため、全く明らかとなっていなかった摩擦攪拌プロセス（FSP）を行った材料表面の切削性について、その特徴が明らかにすることができたことは学術的に非常に有意義であると考えられる。また、その結果、産業界においても十分な適用が進んでいないFSPに関して、今後の積極的な利用に対して指針を示すと共に、FSPを初めとする摩擦攪拌技術に関して、基礎的な知見を示すことにより、技術全体に対する理解を促し、基盤的な生産技術の進展に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This investigation focused on the cutting force and the conditions of the surface after cutting in materials with modified surfaces made using friction stir processing. It compared material with modified surface with dispersed particles, and material with a simply modified surface made using friction stir processing.

The results show that the effect of the characteristics of base material is large, and that the machinability of the materials with modified surfaces made using friction stir processing are almost the same when the base material is the same, regardless of whether they are material with a simply modified surface, or a material with a modified surface with dispersed particles.

研究分野：加工学

キーワード：摩擦攪拌プロセス 切削 表面改質 切削抵抗 残留応力 表面粗さ

1. 研究開始当初の背景

摩擦攪拌接合技術の中で、摩擦攪拌プロセス(FSP)がある。FSPは摩擦攪拌接合を面状に行い、攪拌部に強歪を付与して材料表面を改質する技術である。FSPには、単純に材料表面を攪拌して改質する場合や、硬質粉末材料をFSPにより分散させ、表面のみを金属基複合材料(MMC)のように改質する手法がある²⁾。いずれもFSPを施した領域は複雑な組織となり、残留応力も大きくなる。また、このときの硬質粉末材料の分散による改質部は通常のMMCとは異なり、非常に複雑な微細組織となる。一方で、FSPを行った材料表面はバリが生成し、仕上げ加工を行う必要があり、その加工法として切削が挙げられる。しかし、FSPで改質した領域は複雑な組織状態で、難削化すると予想されるものの、切削性は全く不明なままである。このような背景から、FSPを考える上で、予め改質部の切削性を明らかにしておくことが重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、FSPを行った材料表面の複雑な組織の切削機構の解明を行う一貫で、FSPを行った際の切削性の特徴について明らかにすることを研究目的とした。この時、FSPを行った材料表面切削中の切削抵抗や切削後の表面性状に着目し、FSPによる単純な攪拌での改質部と硬質粉末材料を分散させた改質部とを比較検討した。なお、FSPは、本来、線状に行う摩擦攪拌接合を走査して面上に改質を行うが、現象を単純化したモデルとして、主に単列ビードを対象とした。

3. 研究の方法

単純な攪拌での改質部を得るためのFSPは、プローブ径4mm、プローブ長さ1.9mmおよびシールド径12mmの超合金製ツールを用いて、幅60×長さ150×厚さ15mmのA5052-H34アルミニウム合金板に対して行った。この時のFSP条件は、ツール回転速度1500rpm、送り速度500および700mm/min、処理長さ100mmおよび前進角3°とした。硬質粉末材料を分散させた改質部のFSPは、材料表面に溝加工を行い、溝に粒子を充填した上でFSPを行う手法を採用した。まず、幅60×長さ150×厚さ15mmのA5052-H34アルミニウム合金板に、幅1mm、深さ1mmの溝をエンドミル加工により長手方向に加工した。次に、作製した溝に平均粒径0.1 μ m、純度99.99%のWC粉末を充填した。その後、板長手方向に4回、幅方向に4回のFSPを行った。この時のFSPは、単純な攪拌での改質部を得るためのFSPと同様の超合金製ツールを用いて、FSP条件をツール回転数1500rpm、送り速度100mm/minおよび前進角3°とした。

FSP後の切削は、FSP加工表面に対してフライス加工を行った。単純な攪拌での改質部を得るためのFSPの場合、フライス加工はフライス回転方向がビードを横断し、送り方向がFSPの送りと同軸上になるように行った。なお、送り方向については、FSPの送り方向と同方向になるものと、逆方法になるものについて実施した。この時のフライス加工条件は、切削速度600m/min、送り0.1mm/toothおよび切込み0.5mmとして、乾式で行った。使用した工具はK10種相当の超合金工具で、工具形状は12.7×t4.76mm、コーナ半径0.8mmである。硬質粉末材料を分散させた改質部のFSPの場合、フライス切削条件は、切削速度500および600m/min、送り0.1mm/toothおよび切込み0.5mmとして、乾式で行った。使用した工具は、単純な攪拌での改質部を得るためのFSP表面を切削した場合と同様の超合金工具を用いた。

FSP部の切削性調査には、切削力、表面粗さおよび残留応力を測定した。切削力の測定には、ひずみゲージ式工具動力計を用い、サンプリング周波数10kHz、サンプリング時間20sとした。切削後の表面の評価には表面粗さを測定した。また、単純な攪拌での改質部を得るためのFSPの場合、測定位置はFSP部内でも均一ではないと考えられるため、FSP時のビード中心、FSP前進側(AS)および後進側(RS)相当部の複数箇所を対象とした。残留応力は切削後の表面について、表面粗さを測定した場合と同様の箇所に対して、フライス送り方向をX方向、フライス回転方向をY方向として測定を行った。測定方法はX線残留応力測定装置を用い、ターゲットはCrである。

4. 研究成果

(1) 切削力の測定結果として、図1に単純な攪拌での改質部を得るためのFSP部をフライス切削した場合、および図2に硬質粉末材料を分散させた改質部のFSP部をフライス切削した場合を示す。図1の結果より、比較のために行ったFSPを行わず、アルミニウム合金に切削のみを行った場合は送り分力が大きくなっていたが、FSPによる改質面を切削した場合は主分力が最も大きくなっていた。ここで、FSPの送り方向と同方向になるものと、逆方法になる送り方向については、若干、背分力に違いはあったが、いずれも主分力は140N程度、送り分力は40N程度でほぼ一定していた。さらに、主分力については、FSPの有無によらず140N程度でほぼ一定であった。図2において、こちらもFSPを行わずアルミニウム合金に切削のみを行った場

合と比較した。その中で、各切削速度において **FSP** の有無についても比較した結果、切削速度 **500m/min** においては **FSP** 処理ありの場合、背分力がやや大きいものの、主分力および送り分力は若干小さくなった。一方、切削速度 **600m/min** においては **FSP** 処理ありの場合、主分力、送り分力および背分力ともに若干ではあるが大きくなった。また、切削速度 **500m/min** と **600m/min** の場合を比較した時、**FSP** 処理の有無に関わらず、切削速度 **600m/min** において、送り分力が大きくなるものの、主分力と背分力は同等もしくは低下した。これらのことは、切削力の観点から、適する切削条件が **FSP** 部においては切削速度 **500m/min** であると考えられる。

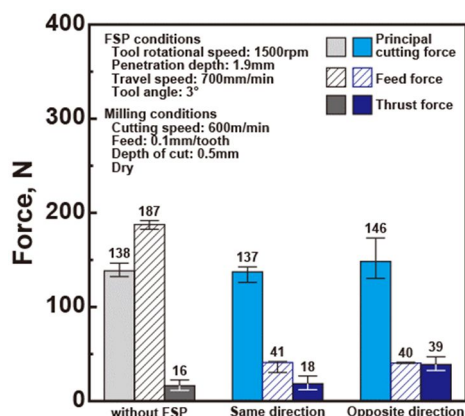


図 1 単純な摩擦攪拌プロセスによって改質された表面の切削力

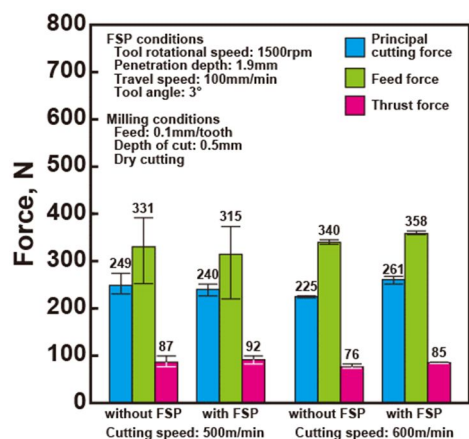


図 2 摩擦攪拌プロセスによって硬質粉末材料を分散させた表面の切削力

(2) 表面粗さの測定結果として、ここでも図 3 に単純な攪拌での改質部を得るための **FSP** 部をフライス切削した場合、および図 4 に硬質粉末材料を分散させた改質部の **FSP** 部をフライス切削した場合を示す。なお、図 3 において、比較のため、切削のみを行った場合の表面粗さ測定結果および理論粗さもあわせて示す。切削のみを行った場合、理論粗さより約 **1.7** 倍の最大粗さとなった。また、**FSP** による改質面を切削した場合、フライス送り方向と **FSP** の送り方向とが同方向になるものと逆方法になるものでは、逆方向になるものが同方向になるものより測定場所に関わりなく表面粗さが大きくなる傾向を示した。加えて、**FSP** 時の攪拌領域中央部 (**SZ**)、攪拌領域のツール回転方向と送り方向が同じ部分 (**AS**)、および攪拌領域のツール回転方向と送り方向が逆の部分 (**RS**) で粗さが異なった。その際、フライス送り方向と **FSP** の送り方向の関係に関わらず、最大高さは **RS**、**SZ**、**AS** の順に大きい結果を示した。それでも、最も表面粗さの値が大きくなる **RS** については、いずれの場合も切削のみを行った場合とほぼ同様の R_z 2.6 μ m 程度となった。図 4 は、**FSP** の有無による切削速度 **500** および **600m/min** を比較したものであるが、切削速度 **500m/min** では **FSP** 処理ありの表面粗さが大きく、切削速度 **600m/min** では **FSP** 処理なしの表面粗さが大きくなった。この時の **FSP** 条件は同様であるので、これらは **FSP** による表面改質部における切削条件の適否が明確になった結果であると考えられる。また、母材部の切削時を示す **FSP** 処理なしの場合、切削速度 **500m/min** では R_z 1.91 μ m、切削速度 **600m/min** では R_z 3.01 μ m であった。理論粗さは R_z 1.56 μ m であることから、粗さの観点からは切削速度 **500m/min** が適する切削条件であると考えられるが、前述したように **FSP** 部においては異なっており、切削速度 **600m/min** が適する切削条件であると考えられる。

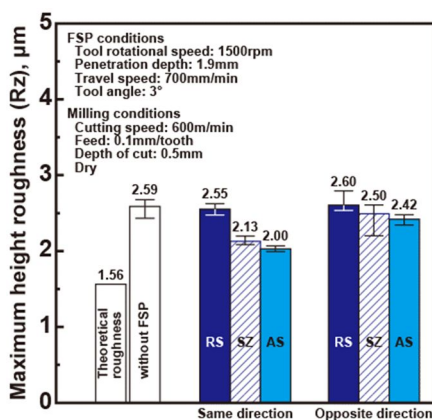


図 3 単純な摩擦攪拌プロセスによって改質された表面の粗さ測定結果

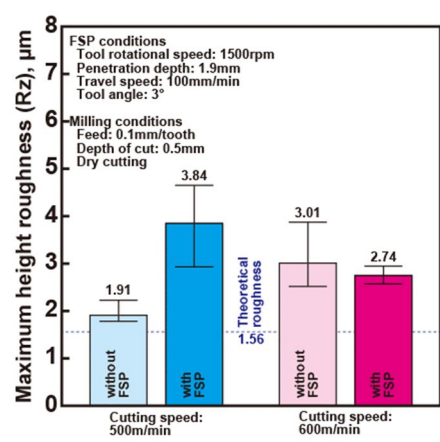


図 4 摩擦攪拌プロセスによって硬質粉末材料を分散させた表面の粗さ測定結果

(3) 残留応力の測定結果として、さらにここでも図 5 に単純な攪拌での改質部を得るための FSP 部をフライス切削した場合、および図 6 に硬質粉末材料を分散させた改質部の FSP 部をフライス切削した場合を示す。図 5 および 6 とともに比較のため、切削のみを行った場合の残留応力測定結果も示す。図 5 において、FSP の有無や測定方向によらず、いずれの場合も引張残留応力を示すプラスの測定結果が得られた。また、FSP を行った場合、フライス回転方向では残留応力が 10MPa 程度ずつ大きくなった。このことは、FSP の有無によらず、図 1 に示した切削力の測定結果において主分力が同様であったことから、主分力方向と同じ方向のフライス回転方向の残留応力が大きくなることは基地部の加工硬化によるものであると推察される。図 6 において、図 5 同様に、FSP の有無や測定方向によらず、いずれの場合も引張残留応力を示すプラスの測定結果が得られた。一方、FSP を行った場合の方が、残留応力は FSP を行っていない場合と同等もしくは小さくなった。このことは、図 2 に示した切削力測定結果において、残留応力測定結果と同様に、FSP の有無や測定方向によらずいずれの場合も切削力に大きな差異はなかったことから、基地部の加工硬化が粒子分散によって抑制され、結果としてほぼ同等もしくはやや低下するような結果になったと推察される。

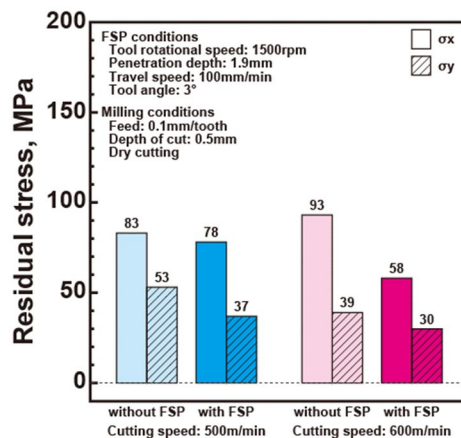
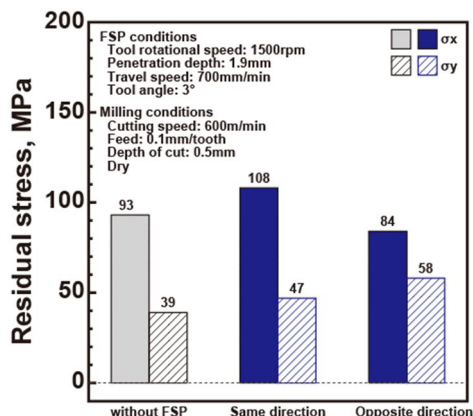


図 5 単純な摩擦攪拌プロセスによって改質された表面の残留応力測定結果

図 6 摩擦攪拌プロセスによって硬質粉末材料を分散させた表面の残留応力測定結果

<参考文献>

- 1) 森貞ら：スマートプロセス学会誌，4-3(2015)，159-163.
- 2) Y. Morisada et al.: Mater. Sci. Eng., A419 (2006) 344-348.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 生田 明彦
2. 発表標題 摩擦攪拌プロセス表面切削の特徴
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 生田 明彦, 崎野 良比呂
2. 発表標題 摩擦攪拌プロセスにより粒子分散強化された表面の切削の特徴
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021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
研究分担者	崎野 良比呂 (Sakino Yoshihiro) (80273712)	近畿大学・工学部・教授 (34419)	

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
---------	---------