摩擦攪拌プロセスを用いた鋳物表面の欠陥補修技術の開発

広島県立総合技術研究所　東部工業技術センター　加工技術研究部
研究員　市川　皓基
（2023 年度 奨励研究助成（若手研究者枠） AF-2023038-C2）

キーワード：摩擦攪拌プロセス（FSP），欠陥補修

１．研究の目的と背景

通常，鋳物は鋳巣やブローホール等の鋳造欠陥を完全に抑制することは困難であり，製造現場において欠陥が見つかった場合は溶接補修されるが，欠陥が大きい場合は廃棄処分されている．また，銅合金やアルミ合金の鋳物は一般に溶接補修が困難とされている．

鋳物の切削加工現場において切削加工中に鋳造欠陥が現れた場合，補修のために鋳物を加工機上から降ろし，溶接による補修を実施した後，再び加工機上に設置し直して切削加工を再開するため，これによる加工コストや時間等の増大が大きな問題となっている．また，欠陥が補修された場合においても，溶接時の過大な入熱により変色が生じて外観不良となり，製品として出荷できず，廃棄処分される場合がある．このことから，鋳造の加工現場では意匠性を保ちつつ，迅速かつ安定的に補修が行える技術が必要とされている．

そこで本研究では，溶接に代わる鋳造欠陥の補修技術として，摩擦攪拌プロセス(Friction Stir Process ；FSP)に注目した．このFSPは摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding; FSW)を応用した技術であり，回転するツールを用いて金属表面を塑性流動させて攪拌し，表面改質する技術である．特長として，溶融溶接が困難，あるいは不可能な材料についても加工が可能であること，材料を溶融させないため低温での加工が可能であること等が挙げられる．さらに，FSW 時に生じるキーホールと呼ばれる穴の補修方法として摩擦攪拌点接合を応用した技術 [1]や，FSW 時のギャップの影響を排除し健全な継手を得ることができる摩擦攪拌粉末プロセス [2]があり，鋳物の欠陥補修技術として期待できる．

しかし，これら摩擦攪拌現象を用いた加工は，通常の切削加工と比較して装置の主軸への負荷が非常に高くなるため，FSW や FSP を行う専用機は一般に剛性が高く設計されている．また，荷重の一部を主軸から分散して筐体などの剛性のより高い所へと逃がすよう設計されている装置もある．一方で，多くの企業が保有している機械加工用の汎用マシニングセンター（以下，汎用 MC）では，通常そのような機構は無く，補修時にかかる負荷により装置寿命が短くなることが懸念される．そのため，汎用 MC を用いて FSP を行うことを想定すると，低荷重で欠陥補修する加工条件の探索も必要となる．

以上のことから，意匠性を保持したまま低荷重で鋳造欠陥を補修する FSP 技術を開発することを目的として，本研究では次の 2 課題に取り組んだ．

1. FSP による銅合金鋳物の欠陥補修
   FSP を用いた銅合金鋳物の欠陥補修を垂直荷重 7kN 以下で実施可能な加工条件を獲得する．
2. FSP によるアルミ合金鋳物の欠陥補修
   銅合金鋳物で得た加工条件を用い，アルミ合金鋳物の欠陥補修が行えるか調査する．

２．FSP による銅合金鋳物の欠陥補修

2.1　実験方法

供試材に銅合金鋳物 CAC406 を用い，板厚 5mm と 25mm の 2 種類の板材を使用した．そしてφ1～3mm のドリルを使用し供試材に深さ 5mm の疑似欠陥を作製した．補修ツールはφ6～10mm の SKD11 製ロッド状ツールを使用した．ここで板厚25mmの補修時における実験風景写真を図 1 に示す．摩擦攪拌接合機（以下，接合機）には芝浦機械製 MPF-2114FS を用いて，補修ツールの回転速度および送り速度をそれぞれ一定としてツールを垂直に押込んだ．そしてツール挿入深さを0.2～0.6mmまで変化させて欠陥の補修を行った．また，補修工程の途中で欠陥が完全に埋まった場合を想定し，過荷重及び変色が発生しないことを確認することを目的として，欠陥を設けない供試材も同様の補修を行った．そして，欠陥補修後の外観および断面の観察と，補修箇所の形状についてレーザー変位計（キーエンス製 LJ-V7080）を用いて測定した．なお，補修中の垂直荷重は接合機のサーボモーターのトルク値より算出した．

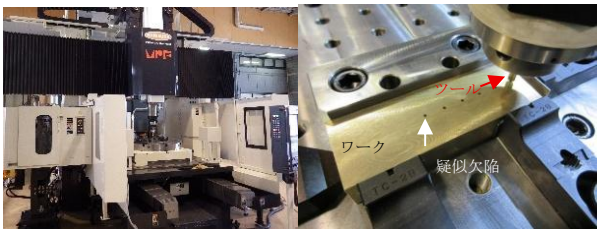
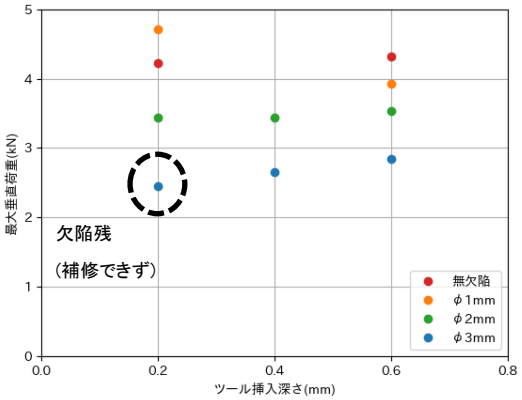


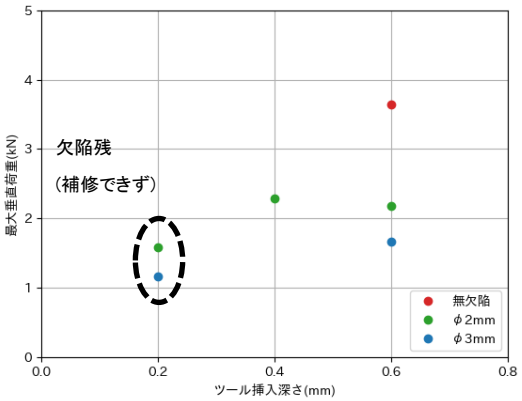
図 1　接合機およびワーク配置外観

2.2　実験結果

板厚 5mm の供試体に設けた疑似欠陥φ1～3mm または無欠陥に対し，φ6mm とφ8mm ツールを用いて補修した時のツール挿入深さと最大垂直荷重の関係を図 2 に示す．図 2 (a)および(b)の両図において，疑似欠陥が大きくなると荷重は低下し，ツール径が小さくなると荷重が低下している．



(a) φ8mm ツール(t5mm)



(b) φ6mm ツール(t5mm)

図 2　ツール挿入深さと最大垂直荷重の関係

また，欠陥が大きく，ツール挿入深さが浅い場合に欠陥が残りやすいことがわかった．

次に，板厚 5mm の供試体に設けた疑似欠陥 φ2mm に対し，φ8mm と φ10mm ツールを用いて，0.2mm 挿入した時の垂直荷重の推移を図 3 に示す．図中に示すツール挿入深さ 0.0mm より早期に垂直荷重が上昇した理由として，疑似欠陥の作製時に生じた僅かなバリとツールの底面が早期に接触したことが考えられる．図 3 より，ツール径 φ8mm での垂直荷重は 3kN 程度であるが，φ10mm ツールの場合は垂直荷重がツール挿入深さ 0.1mm までの過程で急上昇し，その後約 16kN で一定となった．この結果は，ツール径を増大させると垂直荷重が増加しやすく，装置本体への負荷が高まる可能性を示唆している．

続いて，板厚 5mm と 25mm の供試体に設けたそれぞれの疑似欠陥 φ2mm に対し，φ6mm ツールを用いて 0.2mm 押込んだ時のツール挿入深さと垂直荷重の推移を図 4 に示す．これより，厚板材の方がツール挿入時の荷重が大きく増大する結果となった．この垂直荷重が増大した要因として，ワークが持つ高い熱伝導率および熱容量が関係していると考えられる．すなわち，塑性流動による補修には材料をある温度以上に加熱する必要があるが，発生した熱が金属中に拡散しやすいために必要な温度が得られず，流動性が低下したものと推測される．

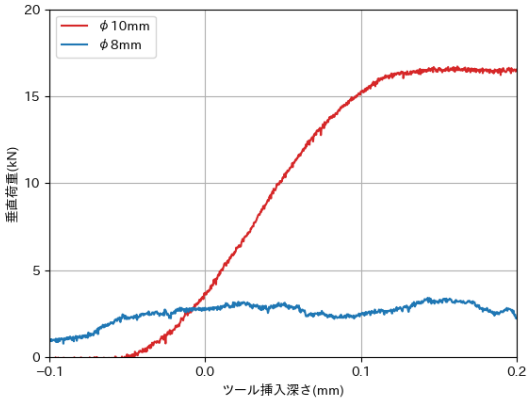


図 3　ツール径によるツール挿入深さと垂直荷重の推移(t5mm，疑似欠陥 φ2mm)

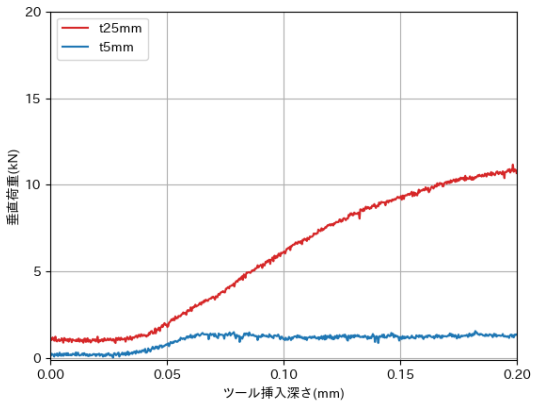
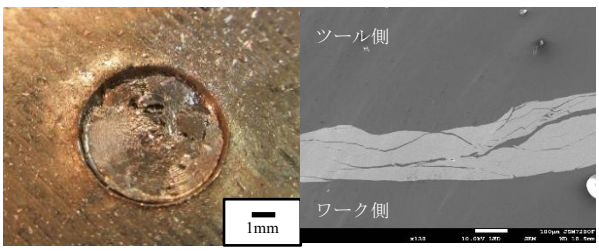


図 4　板厚によるツール挿入深さと垂直荷重の推移（ツール径 φ6mm，疑似欠陥 φ2mm）

さらに，銅合金鋳物を対象とした今回の実験における大きな特徴として，加工時に生じる切粉がツール挿入時に圧縮され，ツールとワークの界面に薄片状の物質（以下，加工変質層）が生じる結果となった．加工変質層が付着した状態のワーク外観写真および加工変質層単体断面の電子顕微鏡観察写真を図 5 に示す．図 5(b)より加工変質層は複数の薄い層からなることが確認できることから，FSP 中において形成され，ツール挿入深さの増加に伴い積層して肥大化したと推測される．このような加工変質層もまた，押込み時に垂直荷重が増大する一要因になっているものと考えられる．



(a)外観写真　　(b)断面の SEM 像

図 5　加工変質層の観察写真(t25mm)

ここで，加工変質層の影響を調査するため，板厚 25mm の供試体に設けた疑似欠陥 φ2mm に対し，φ6mm ツールを用いて補修した箇所のビッカース硬さ試験結果を図 6 に示す．なお，硬さの測定は補修箇所の最下点より 0.1mm の深さにて行った．また，図中には比較として，母材と加工変質層のビッカース硬度も併せて示した．これより，補修箇所の硬度は母材と比較して高いことがわかる．補修箇所および加工変質層の硬度が母材よりも上昇した理由は，加工硬化によるものと考えられる．

また，本補修はツールを 0.4mm 押込んだが，実際の補修箇所の深さは 0.6mm であった．これは，加工変質層は母材よりも硬くなることで，ツール先端としての役割を果たしていたと考えられる．すなわち，加工変質層が切削加工における構成刃先に相当するものとなり，実際のツール先端位置よりも板材内部にツールが押込まれた状態になったと推測される．このように加工変質層が肥大化したことで，より深く押込まれた状態となり，過大な垂直荷重が発生したと考えられる．

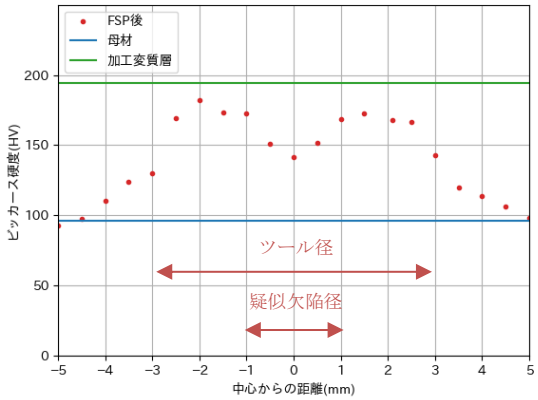
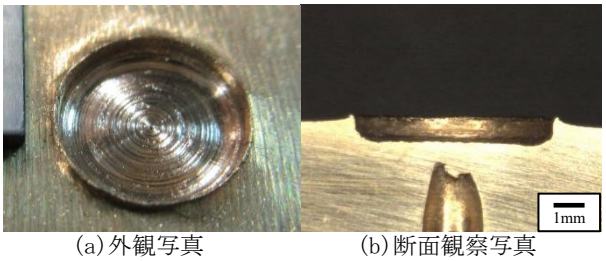


図 6　FSP 補修後のビッカース硬度(ツール径 φ6mm, 疑似欠陥 φ2mm)

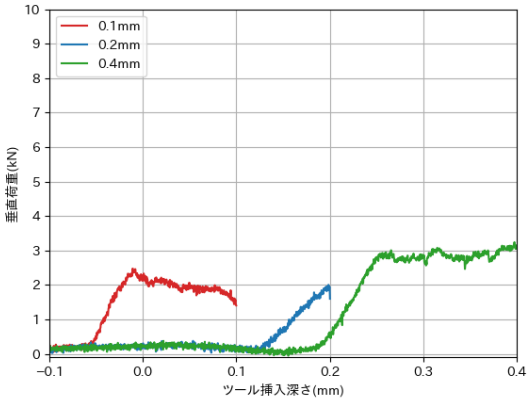
次に，加工変質層が肥大化する前に適宜ツールとワークの界面から加工変質層を排除することで，過大な垂直荷重の発生を抑制することを試みた．具体的には，目標とするツール挿入深さに対し，一度に挿入するのではなく，最終目標とするツール挿入深さよりも浅い段階で一旦ツールを引き上げ，加工変質層を除去した後に，もう一度挿入することを繰り返すことで，段階的に補修した(以下，間欠送り)．なお，段階的なツールの挿入深さはワーク表面から 0.1，0.2，0.4mm とした．

ここで，板厚 25mm の供試体に設けた疑似欠陥 φ2mm に対して φ6mm ツールを用いて間欠送りによる欠陥補修後の外観写真および断面観察写真を図 7 に示す．これより，外観上の変色もなく，封口が実現できていることがわかる．また，板厚 25mm の供試体に設けた疑似欠陥 φ2mm と無欠陥に対し，φ6mm ツールを用いて間欠送りした時のツール挿入深さと垂直荷重の推移を図 8 に示す．図 8(b)より，補修方法を間欠送りにすることによって，無欠陥

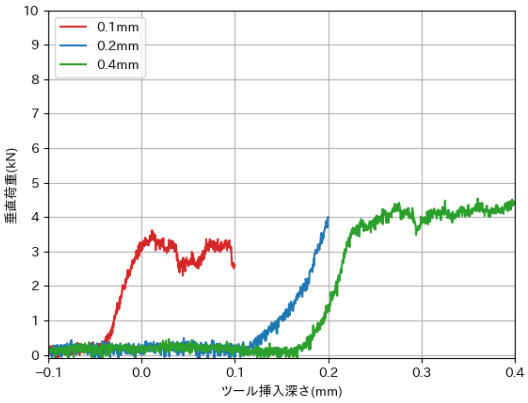


(a)外観写真　　(b)断面観察写真

図 7　間欠送り後の観察写真(ツール径 φ6mm，t25mm)



(a)疑似欠陥 φ2mm



(b)無欠陥

図 8　間欠送り時のツール挿入深さと垂直荷重の推移(ツール径 φ6mm，t25mm)

の状態であっても最大垂直荷重を 5kN 以下に抑え，過大な垂直荷重の発生を抑制することができていることが確認できる．さらに，図 8(a)の疑似欠陥 φ2mm では，約 3kN 程度にまで垂直荷重が抑制できることがわかった．

次に，板厚 25mm の供試体に設けた疑似欠陥 φ2mm に対し，φ6mm ツールを用いて間欠送りにより 0.4mm 挿入した時の補修箇所の形状計測結果を図 9 に示す．比較として，図には無欠陥に対して同様に加工した結果も併せて示す．これより，疑似欠陥 φ2mm と無欠陥ともに補修後の最下点はワーク表面から 0.6mm 程度であり，ツールの挿入深さ 0.4mm よりも 0.2mm 程度深くなっていることがわ

かる．これは形成される加工変質層により，深く抉られるようにして生じたと考えられる．したがって，補修方法を間欠送りに変更することにより，加工変質層の肥大化を抑制できたものの，その発生を完全には抑制できていないことが分かった．

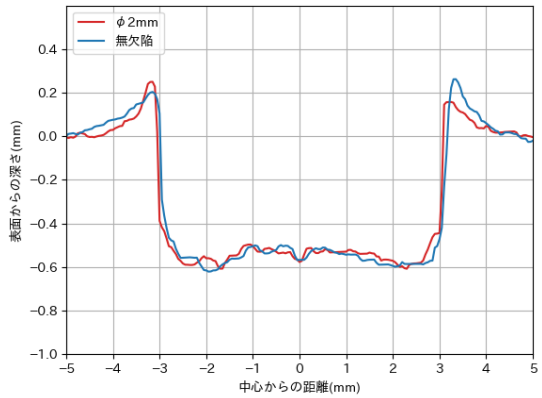


図9　間欠送り後の形状計測結果(ツール径φ6mm, t25mm)

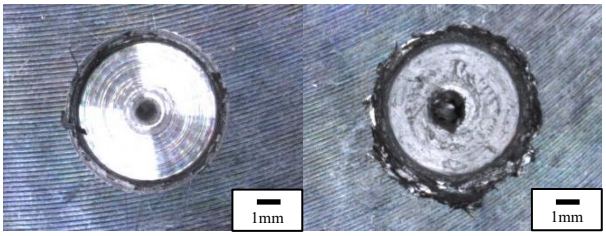
3．FSP によるアルミ合金鋳物の欠陥補修

3.1　実験方法

銅合金鋳物 CAC406 にて得られた間欠送りによる FSP 条件の適用可能範囲をさらに拡張することを目的として，アルミ合金鋳物への適用を試みた．供試材にアルミ合金鋳物 AC4CH を用い，形状は板厚 5mm の板材を使用した．そして，φ2，φ3mm のドリルを使用し，供試材に深さ 5mm の穴を開け疑似欠陥を作製した．補修ツールは銅合金鋳物と同一の φ6mm と φ8mm の SKD11 製ツールを用い，間欠送りによる補修を行った．補修工程の途中において完全に鋳造欠陥が埋まった場合における最大垂直荷重を調査することを目的として，疑似欠陥を設けない場合についても同様の補修を行った．そして，欠陥補修後の外観および断面の観察と，補修箇所の形状についてレーザー変位計（キーエンス製 LJ-V7080）を用いて測定した．なお，接合中における垂直荷重は接合機のサーボモーターのトルク値より算出した．

3.2　実験結果

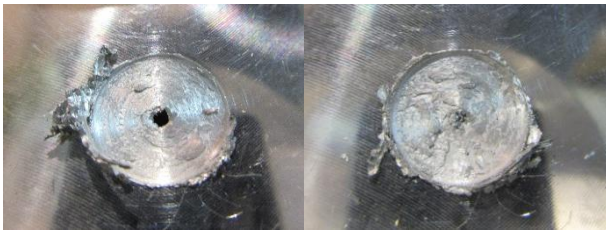
供試体に設けた疑似欠陥 φ2，φ3mm に対し，φ6mm ツールを用いて間欠送りを適用した後の外観写真を図10に示す．図 10 より，疑似欠陥 φ2mm においては中央部に窪みが見受けられ，φ3mm においては大きな穴状欠陥が残存する様子が確認できる．このことから，径の大きい鋳造欠陥に対応するために，ツール径の増加による塑性流動の促進が必要であると考えられる．



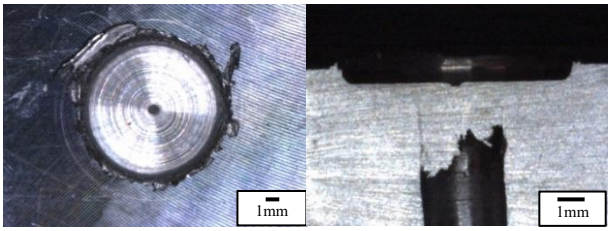
(a)疑似欠陥 φ2mm　　(b)疑似欠陥 φ3mm

図 10　φ6mm ツールでの間欠送り後の外観写真

次に，供試材に設けた疑似欠陥 φ3mm に対し，φ8mm ツールを用いて間欠送りを適用した時の外観写真を図11に示す．図 11(a)および(b)より，ツール挿入深さ 0.1mm と 0.2mm では表面に凹凸が生じているのに対し，図 11(c)のツール挿入深さ 0.4mm では中央部に窪みが見られるものの，ほぼ平滑である様子が確認できる．また，図 11(d)の断面写真より封口が行えているが，中心部には小さな窪みが残存していることがわかる．



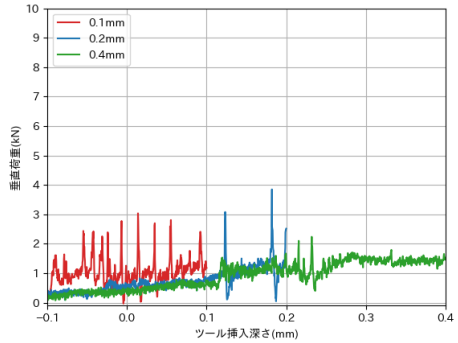
(a)挿入 0.1mm　　(b)挿入 0.2mm



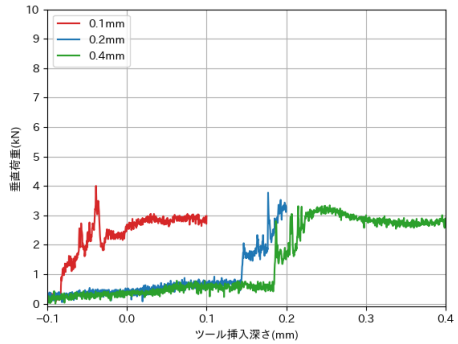
(c)挿入 0.4mm　　(d)挿入 0.4mm の断面写真

図 11　φ8mm ツールでの間欠送り後の外観写真

次に，疑似欠陥 φ3mm と無欠陥に対し，φ8mm ツールを用いて間欠送りによる補修を行った時の垂直荷重の推移を図 12 に，間欠送りを適用した補修箇所の形状計測結果を図 13 に示す．図 12(a)より，疑似欠陥φ3mm のツール挿入深さ 0.2mm までは垂直荷重が約 3kN のピークとして発生し，ツール挿入深さ 0.4mm では約 1.5kN で安定する様子が確認できる．この疑似欠陥φ3mm でツール挿入深さ 0.2mm 程度までに生じたピーク挙動について，ピーク時の垂直荷重は図 12(b)の無欠陥の補修時における垂直荷重と同程度であることから，両者の塑性流動の特性に顕著な違いはなかったものと推測される．そして，加工変質層が疑似欠陥の内部またはバリとして外部に排出されるのに十分な荷重がかかった後，排出されたことで荷重が急激に低下し，ピーク挙動が生じたものと考えられる．また図 13 より，疑似欠陥φ3mm では表面からの深さは最も深い場所で約 0.8mm であり，前述の図 11 と同様に中央部における攪拌は十分に行えていないことが考えられる．なお，疑似欠陥φ3mm と無欠陥ともにツールの目標の挿入深さ 0.4mm よりも 0.2mm 程度深い距離の 0.6mm となっている様子が確認できる．なお，深さ 0.4mm の挿



(a) 疑似欠陥 φ3mm



(b) 無欠陥

図 12　φ8mm ツールでの間欠送りによる垂直荷重の推移

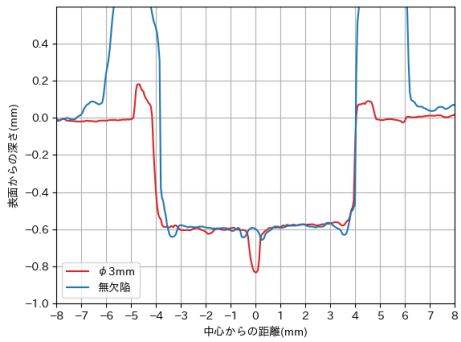


図 13　φ8mm ツールでの間欠送り後の形状計測結果

入後に補修箇所の底面やツール底面に加工変質層が形成されている様子は見受けられなかった．このため，補修中に余剰となる材料は疑似欠陥へと流入したことや，バリとして外部へ排出されたことが考えられる．

4．まとめ

汎用 MC でも実施可能な鋳物の欠陥補修技術を獲得することを目的として，銅合金およびアルミ合金の鋳物に対して疑似欠陥を形成し，FSP による補修実験を行った．銅合金鋳物の欠陥補修においては，目標の垂直荷重 7kN 以下で欠陥を補修することができるツール径，加工条件の組み合わせを獲得することができ，供試材の板厚の変化により，加工条件の最適化が必要であることが確認できた．また，加工変質層の形成によりツールの挿入深さよりも 0.2mm 程度深くなることから，現場での補修加工においては，加工代の幅を大きくする必要があると考えられる．

また，銅合金鋳物で得られた欠陥補修方法をアルミ合金鋳物へと応用した場合，中央部では塑性流動が不十分となり，僅かに窪みが残存することで，さらに加工代を必要とするものの，封口は可能であることがわかった．したがって，塑性流動の特性が異なるために，材種や板厚，鋳造欠陥の大きさに応じて補修ツールの挿入深さやツール径の最適化が必要となるが，これらを考慮することにより，他種材料へも応用可能であることが確認できた．

謝　辞

本研究は公益財団法人天田財団奨励研究助成（若手研究者枠）を利用して行われたものであり，ここに深く感謝の意を表します．

参考文献

1)　生田明彦，Thomas H. North，植松美彦：溶接学会論文集，34(2016)3

2)　藤井英俊，稲田孝治，孫 玉峰，池 英洙，森貞好昭：溶接学会全国大会講演概要，(2010)86