

摩擦攪拌プロセスによる異種材料のスポット接合と鋳鉄の表面改質 (第5報)

摩擦攪拌プロセスによる鋳鉄の表面改質

水谷 予志生、戸崎 康成

Spot Welding of Dissimilar materials and Surface Modification of Cast Iron by using Friction Stir Process (V)

Surface Modification of Cast Iron by using Friction Stir Process

Yoshiki Mizutani and Yasunari Tozaki

回転しているツールをワークに押しつけて移動させることでワーク表面を改質する摩擦攪拌プロセス(Friction Stir Processing : FSP)を鋳鉄に適用した。φ8mmの超硬ツールを用いて片状黒鉛鋳鉄(FC250)の表面を直線的に加工し、加工条件(ツール回転数、移動速度)と加工時温度・マイクロ組織・硬さとの関係を調べた。いずれの加工条件でも片状黒鉛の微細化は起こらなかったが、回転数 2000rpm 以上でパーライト組織が変化した領域が観察された。この組織変化領域は回転数が大きくなるにつれ深くなっていた。これは、サーモビューアによる温度測定で回転数が大きくなるにつれ加工時の温度が高くなっていたことに良く一致する。これらの組織変化領域の硬さは、素地部のパーライト組織が約 250HV であるのに対し、500~800HV と硬化しているのが確認された。

1. はじめに

近年、新しい表面改質法として注目されている摩擦攪拌プロセス(Friction Stir Processing : FSP)とは、摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding:FSW)技術を応用し、先端に逆ネジ(ピン)のついた回転工具(ツール)を高速で回転させながらワークに押し込み、その時に発生する摩擦熱と攪拌力でワークの表面改質を行うという技術である。これまでは低融点のアルミニウムやマグネシウム合金で研究されてきた^{1~5)}が、さらに高融点の鉄鋼系への応用^{6~9)}も研究され始めている。しかし、鉄鋼系への適用には従来の軽合金用と同様のツールをそのまま使用することはできず、材質を多結晶立方晶窒化ホウ素(PCBN)や超硬合金(WC)に変え、ピンの長さを短く、あるいは無くすといった形状の変化も行う必要がある。

著者等は以前の研究で、ピン無し超硬ツールで主にスポット的な FSP 加工を鋳鉄に適用し、加工条件(ツール回転数、保持時間、押込深さ)とマイクロ組織・硬さへの影響を調べた¹⁰⁾。その結果、攪拌効果で片状黒鉛まで微細化された領域と摩擦熱によりパーライト組織のみが変化した領域が観察されたが、黒鉛が微細化された領域は剥がれやすいことが分かった。また、これらの組織の硬さは、黒鉛が微細化された最表面の領域は約 600HV、その下の熱影響部では約 800HV といずれも基地のパーライト組織(約 250HV)より硬化させることができた。このスポット的な FSP 加工では硬化領域が小さいため、より大きな範囲を改質するために FSP によるライン加工を行った。FSP 加工条件(ツール回転数、移動速度)を変化させ、加工時の温度とマイクロ組織や硬さへの影響を調査した。

2. 実験方法

鋳放しの片状黒鉛鋳鉄(FC250)を板厚 5mm に研削加工し、FSP 用試料とした。FSP には自動摩擦溶接機

(株)日立設備エンジニアリング社製、SHH204-718 型)を用いた。FSP ツールは図 1 のように、本体部分は SKD11 であるが、鋳鉄試料と接触する先端部分はφ8mmの超硬合金となっている。このツールは進行方向後方に 3° 傾かせてあり、高速回転させながらワーク表面に 0.5mm 押し込み、そのまま 50mm 移動させることで FSP を行った。この時のツールの回転数、移動速度を変えて FSP を行い、断面の組織観察とマイクロビッカース硬さ試験を行った。また、表面を軽く研磨して FSP 加工痕を消した状態の試料面について、ロックウェル硬さ試験による表面硬度の測定も行った。さらに、FSP 加工時の温度測定を行うため、サーモビューア((株)アピステ製、FSV-1100-H16)による熱画像の測定も行った。

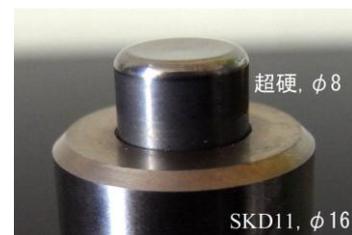


図1 FSP ツール先端部

3. 結果及び考察

図 2 に FSP 加工中のワークとツールの様子を示す。いずれも移動速度は 200mm/min であり、図 2 (a)は回転数 1000rpm、(b)は 2000rpm、(c)は 3000rpm である。回転数が増加するとツール先端が赤熱してくるが、ワーク表面が赤熱することはなかった。このことから、加工部が局所的に高温になり、ツール通過後には急速に冷却されていることが分かる。この時の温度分布を測定するために、サーモビューアで熱画像を測定した。各加工条件中で温度が最高になった時の熱画像とその温度を図 3 に示す。サーモビューアのような光学式の温度測定の場合、

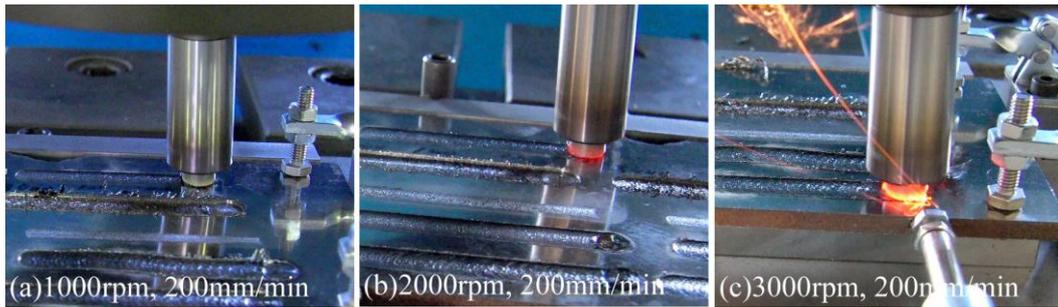


図2 FSP 加工中のワークとツールの様子

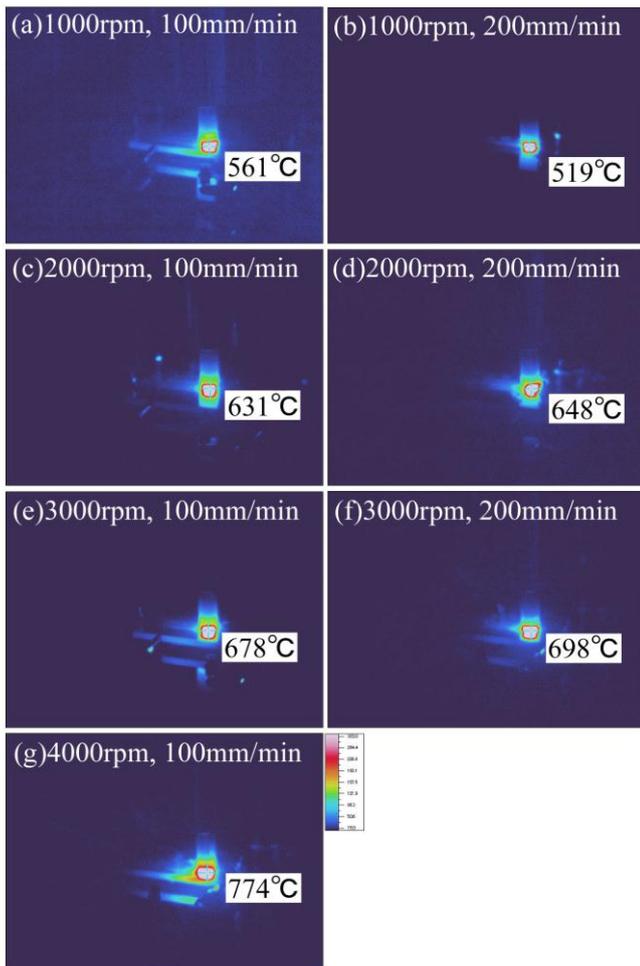


図3 FSP 加工中の熱画像と最高温度

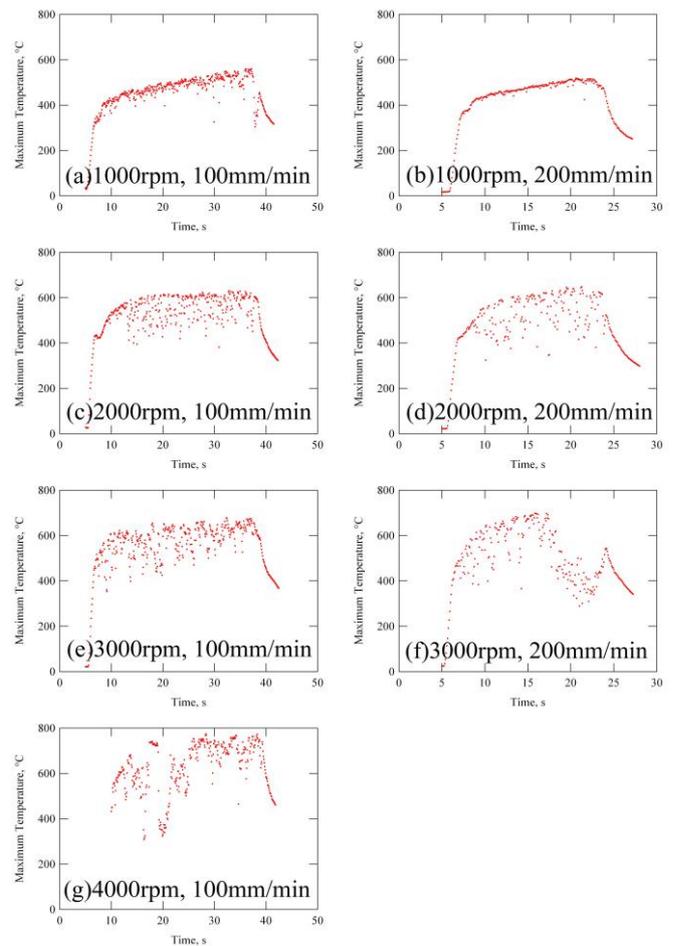


図4 FSP 加工中の最高温度の経時変化

放射率を適切に設定し、温度の補正をしなければ正確な温度とはいえないが、今回は温度補正までは行っていない。回転数を上げる、または移動速度を速くすると加工部の温度が高くなる傾向にあった。それに伴い、ツール通過後のワークの温度も高くなる傾向にあったが、最高温度が 774°C と最も高かった図 3 (g) でもワーク表面はすぐに 200°C 以下になっており、過熱・冷却の速度が非常に速いことが分かる。この FSP 加工中の最高温度を時間に対してプロットしたグラフを図 4 に示す。回転数が低く加工温度が低かった場合は、小さな切削片がすぐに

飛散していたが、回転数が高くなり加工温度が高くなると、切削片が繋がってツールの周りに巻き付くような形態になった。このため高回転数の場合、グラフ上では温度が激しく低下しているが、実際にはツールに巻き付いた切削片によって加工部の温度が測定できていないだけで加工部自体は高温になっている。いずれも加工距離は 50mm であり、加工開始から右肩上がりで温度が上昇する傾向にあったが、回転数が高い場合は温度上昇の傾きが緩やかになっていることから、定常状態になるまでの距離が短くなると考えられる。しかし、今回の加工距離

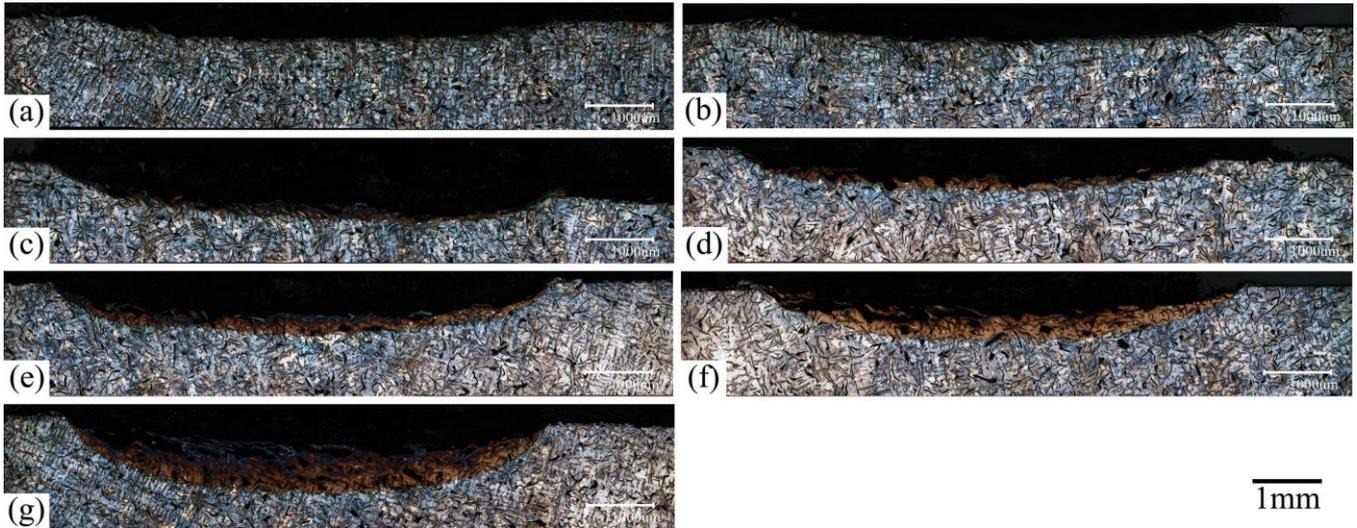


図5 FSP 加工後の断面組織、(a)回転数 1000rpm, 移動速度 100mm/min, (b)1000rpm, 200mm/min, (c)2000rpm, 100mm/min, (d)2000rpm, 200mm/min, (e)3000rpm, 100mm/min, (f)3000rpm, 200mm/min, (g)4000rpm, 100mm/min

では加工開始部と終了部では組織に違いがあることが予想されるため、加工開始から 40mm の断面を観察することにした。

図5にその断面の全体組織写真を示す。いずれもツールは紙面手前から奥に向かって通過しており、写真左側がツールの回転方向とツールの移動方向が同じになる AS (Advancing Side)側、右側がこれらの方向が異なる RS (Retreating Side)側となる。ピンが押し込まれて攪拌が行われる通常の FSP では、この AS 側と RS 側で非対称な組織となるが、本研究のピン無しツールの場合、左右での組織の違いは特に無かった。回転数 1000rpm で加工した場合、試料が円弧状に削り取られただけで、ほとんど組織変化領域は見られないが、回転数を 2000rpm にすると表面直下に基地組織が変化した茶色の領域が薄く広がっていた。回転数を 3000, 4000rpm と高くしたり、ツール移動速度を上げると組織変化領域が深くなった。特に深さが最大となった 4000rpm, 100mm/min で FSP を行った試料では、中心部で約 600 μ m の深さの変質層が得られた。これらの組織の拡大図を図6に示す。図6 (a)は FSP 未処理の FC250 鋳鉄基地組織の拡大写真であり、片状黒鉛と典型的なパーライト組織が観察される。図6 (b)は回転数 1000rpm、移動速度 200mm/min で FSP した試料の表面近傍の組織である。片状黒鉛がやや流されたような形状に変化していたり、基地のパーライト組織もやや変化しているが、いずれも深さ 100 μ m 以下の領域であり、FSP の影響は小さいといえる。図6 (c)は 2000rpm、100mm/min の試料の基地部と組織変化領域の境界部分の拡大写真である。基地組織と大きく異なり、5%ナイトールによるエッチングにより茶色く変色した部分と、パーライト組織から崩れているが茶色ではなく青っぽい部分とが観察された。図6 (d)は 3000rpm、

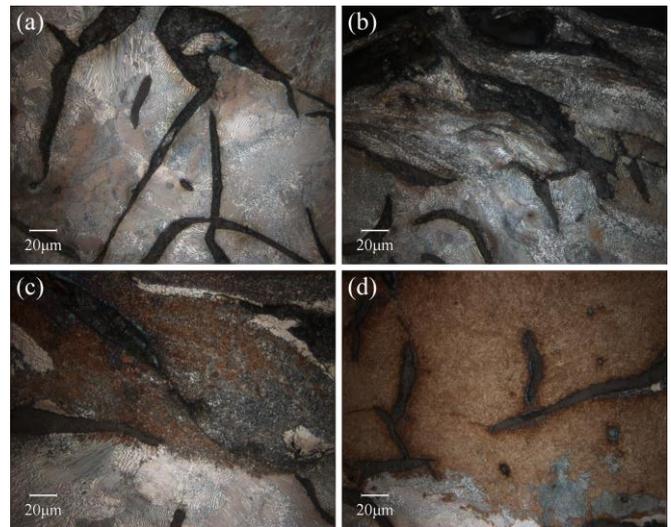


図6 FSP 加工後のマイクロ組織、(a)FC250 as cast, (b)1000rpm, 200mm/min, (c)2000rpm, 100mm/min, (d)3000rpm, 200mm/min

表1 基地組織のマイクロビッカース硬さ

	100mm/min	200mm/min
1000rpm	218	285
2000rpm	513	807
3000rpm	680	813
4000rpm	794	
pearlite (without FSP)		251

200mm/min の試料の境界部分であるが、この試料の組織変化領域は茶色の微細な組織と片状黒鉛からなってい

た。これらの基地組織のみに圧子が当たるように調整し、各試料5点以上のマイクロビッカース硬さを調べ、その平均値を表1に示す。基地組織のパーライトは約250HVであることから、2000rpm以上では非常に硬化しているのが分かる。図5より、2000rpm以上では図6(c)(d)のような茶色の非常に微細な組織が存在しており、800HV程度の硬さがあることから、これはマルテンサイト組織であると考えられる。図3の温度測定より、ツール温度が630°C以上であれば試料表面は局所的にA₁変態点の727°C以上になり、パーライトからオーステナイトへの変態の後、急冷されることでマルテンサイト化したと考えられる。一方、1000rpmではツールの温度が600°C以下であり、摩擦熱不足から試料の温度がA₁変態点以上まで上がらなかったため、マルテンサイト化しなかったと考えられる。

上述のマイクロビッカースは局所的な組織の硬さを調べることはできるが、組織全体の硬さを評価することはできない。表1は基地組織のみの硬さであるが、片状黒鉛を含めた材料全体の硬さを調べるために、通常鋳物に対してはブリネル硬さ試験を行う。しかし、800HV以上の硬さとなったものに対してはブリネル硬さ試験では硬すぎる。そこで、今度は未加工のFC250に対しては規格外となってしまうため、参考程度ではあるがロックウェル硬さによる評価を検討した。FSP加工を行うと、回転ツールが移動した痕跡が大きな凹凸として残るため、FSP加工痕が消えるまで試料表面を軽く研磨し、測定が可能な物に関してロックウェル硬さ試験を行った。その結果、FSP未加工のFC250では本来規格外であるが、数値上約6HRCと計測されたのに対し、3000rpm、200mm/minでFSPを行ったもので約20HRC、4000rpm、100mm/minでFSPを行ったもので約40HRCと計測された。いずれも本来の硬さ試験ではイレギュラーな測定であり、場所によって大きく数値が異なっているが、FSPを行うことで大幅に硬化することが分かった。今後、より大きな面のFSP改質を行い、摩擦摩耗特性等の機械的特性を評価することが課題である。

4. まとめ

片状黒鉛鋳鉄(FC250)に摩擦攪拌プロセス(FSP)を適用し、表面硬化させることを検討した。

(i) 加工中の温度をサーモグラフィで測定することで、ツールの回転数を上げる、または移動速度が速くなるこ

とで、加工部の温度が高くなることを確認した。

(ii) 回転数1000rpmでは、移動速度100, 200mm/minのいずれの条件でも摩擦熱が不足し、パーライト組織がマルテンサイト化する温度まで達せず、硬化しなかった。

(iii) 回転数を2000rpm以上にすると、マルテンサイト化した領域が出現し、回転数・移動速度の増加でその領域が深さ方向に拡大した。今回の研究の範囲では、回転数4000rpm、移動速度100mm/minでFSPを行った試料で最大600μmの深さの硬化層が得られた。

(iv) FSP未加工のパーライト組織では約250HVの硬さに対し、FSP後のマルテンサイト組織では約800HVと硬化していた。

(v) 局所的な硬さだけでなく、片状黒鉛を含めた全体的な硬さでも非常に硬化していることから、耐摩耗部材として期待できる。

【謝 辞】

本研究を行う上で、鋳鉄試料の提供をして頂いた株式会社ナベヤの西川秀輝様、平井健太郎様、原真文様に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 権湧宰, 重松一典, 斎藤尚文: 日本金属学会誌, 66 (2002), 1325.
- 2) 佐藤裕, 粉川博之: まてりあ, 42 (2003), 214.
- 3) Y.J.Kwon, I.Shigematsu and N.Saito: Scripta Mater., 49 (2003), 785.
- 4) 斎藤尚文, 権湧宰, 重松一典: まてりあ, 43 (2004), 592.
- 5) 水谷予志生, 細野幸太, 柴田英明, 戸崎康成, 山口貴嗣: 岐阜県産業技術センター研究報告, 1 (2007), 64.
- 6) 山口泰文, 藤井英俊, 木口昭二, 野城清: 鋳造工学, 80 (2008), 15.
- 7) 藤井英俊: 軽金属, 57 (2007), 499.
- 8) 河内美穂子, 晴山巧, 中村満, 澤田祐貴: 鋳造工学, 82 (2010), 337.
- 9) 今川浩一, 藤井英俊, 山口泰文, 木口昭二: 鋳造工学, 82 (2010), 674.
- 10) 水谷予志生, 戸崎康成, 細野幸太, 大津崇: 岐阜県機械材料研究所研究報告, 3 (2010), 35.