

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4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、細野幸太、大津崇

Spot Welding of Dissimilar Materials and Surface Modification of Cast Iron by Using Friction Stir Process (IV)
Surface Modification of Cast Iron by Using Friction Stir Process
Yoshiki Mizutani, Yasunari Tozaki, Kota Hosono and Takashi Otsu

新しい表面改質手法として注目されている摩擦攪拌プロセス(Friction Stir Processing : FSP)の鋳鉄への応用を検討した。φ8mm の超硬ツールを用いて片状黒鉛鋳鉄鋳物(FC250)の表面にスポット加工とライン加工の 2 種類の FSP を施し、組織観察と硬さ試験を行った。スポット加工では黒鉛まで微細化された領域と摩擦熱による熱影響部が観察されたが、黒鉛が微細化された領域は剥がれやすく、剥離してしまった試料も多数あった。ライン加工では、摩擦熱による熱影響部のみが確認され、その深さが加工し始めから終了地点に向けて深くなっていた。摩擦熱が大きくなる加工条件で組織変化領域が大きくなっていた。これらの領域の硬さは、素地部では約 250HV であるのに対し、300~870HV と硬化しているのが確認された。

1. はじめに

主にアルミニウム合金の接合を目的として開発された摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding:FSW)法は、接合法としてだけでなく、部材の組織改質に応用する摩擦攪拌プロセス(Friction Stir Processing : FSP)技術の開発も行われている¹⁻³⁾。これまでの研究で、アルミニウム合金やマグネシウム合金の展伸材・鋳造材等に FSP を適用し、機械的特性への影響を調べた。その結果、組織微細化・均一化といった変化が起こり、材料によっては強度や伸びが向上した。特に、鋳造材に FSP を適用した場合には、組織微細化だけでなく、鋳造欠陥が除去されることもメリットとして挙げられる。

この FSW, FSP は、主に軽金属が対象であったが、より融点の高い鉄鋼材料でも研究例が出てきている^{4,5)}。しかし、鉄鋼材料への FSW 適用の場合、FSW ツールの損傷(特にピン部)が激しいことが大きな問題である。現在では、多結晶立方晶窒化ホウ素(PCBN) や超硬合金といった材料が FSW ツールとして使われているが、さらに高強度、長寿命なツールの開発が望まれている。また近年では、FSW ツールへの負荷を低減させるため、対象材料に押し入るプローブ(ピン)部分の無いピン無しツールによる表面改質も検討されてきている。

鋳鉄表面を硬化させるために、現場ではガスバーナー等であぶる火炎硬化が一般的に行われている。しかしこの方法では、品質が作業者に依存するため、不安定なものとなる。そこで、機械加工的な手法による表面改質が求められており、FSP の鋳鉄への応用を検討した。本研究では、ツールへの負荷の小さいピン無しツールで鋳鉄鋳物の表面改質を試みた。FSP の加工条件と組織・硬さへの影響を調べた。

2. 実験方法

鋳放しの片状黒鉛鋳鉄鋳物(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(㈱日立設備エンジニアリング社製、SHH204-718 型)を用いた。FSW 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 の超硬合金とした。FSP はスポット加工とライン加工の 2 種類を行った。スポット加工の場合、回転数、保持時間、押込深さを変化させ、ライン加工は回転数のみを変化させ、それぞれ組織観察とマイクロビッカース硬さ試験を行った。

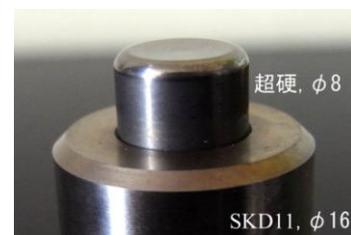


図1 FSW ツール先端部

3. 結果及び考察

図 2 に保持時間 6s、押込深さ 0.5mm で回転数を変えた場合のスポット FSP の外観を示す。回転数を大きくするにつれ被加工領域が大きくなっている。今回、保持時間を 2, 4, 6s、回転数を 1000, 2000, 3000rpm、押込深さ

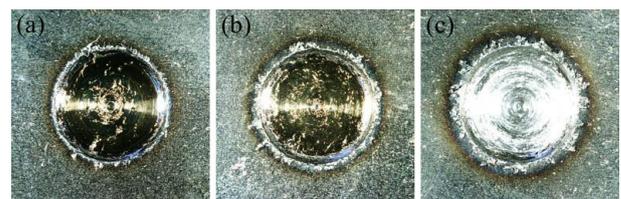


図2 保持時間 6s、押込深さ 0.5mm で回転数を変えた場合のスポット FSP の外観、
回転数：(a)1000rpm, (b)2000rpm, (c)3000rpm

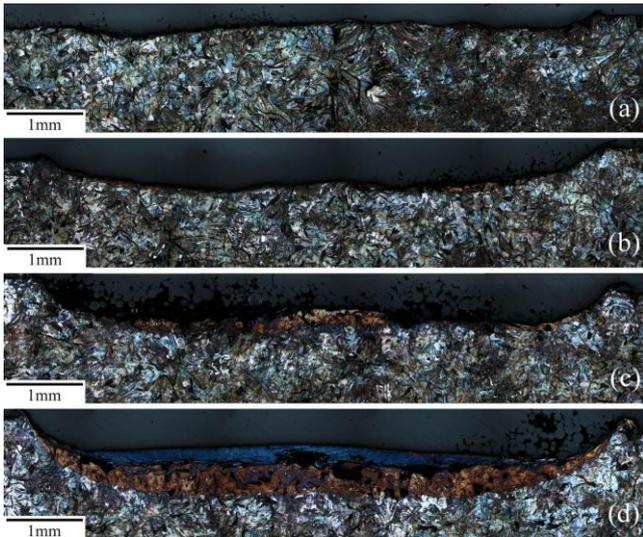


図3 回転数 3000rpm, 保持時間 2s で押込深さを変えた場合のスポット FSP 断面マクロ組織、押込深さ : (a)0.3mm, (b)0.4mm, (c)0.5mm, (d)0.6mm

を 0.3, 0.4, 0.5, 0.6mm と変化させたが、それぞれ大きくするにつれ同様の結果となった。

図3に回転数 3000rpm, 保持時間 2s で一定とし、押込深さを変えた場合のスポット FSP の断面マクロ組織の変化を示す。図3(a)の押込深さ 0.3mm では表面がほとんどえぐられただけだが、図3(b)の 0.4mm で茶色の熱影響領域が観察され始め、押込深さが大きくなるにつれ熱影響部の深さも大きくなっていった。また、押込深さ 0.6mm では最表面に薄く攪拌領域が観察された。この攪拌領域と熱影響部との境界にはクラックが多く入っており、非常に剥がれやすく、他の試料では剥離してしまったものも多数あった。

図4に回転数 1000rpm、押込深さ 0.6mm でスポット FSP したマイクロ組織を示す。いずれも片状黒鉛が微細化された領域が観察されており、図4(a)の保持時間 2s より(b)の保持時間 4sの方がその微細化領域が深くなっていた。図4(c),(d)は図4(a)の試料の微細化領域のうち、それぞれ上部と下部の拡大写真である。下部の図4(d)では、片状黒鉛が FSP の攪拌流れに沿って筋状に変化しており、図4(c)の最表面近傍では黒鉛がサブミクロンオーダーにまで微細化され、均一な組織となっていた。図4(d)のような組織の下は内部の組織と同様に、片状黒鉛とパーライト組織からなっていた。これらの組織の硬さをマイクロビッカースで調べたところ、基地のパーライト部では約 250HV であるのに対し、図4(c)の攪拌域上部では約 600HV、(d)の攪拌域下部では約 300HV といずれも硬化していた。攪拌域下部では比較的大きな黒鉛を含んでいるため、硬度が低くなったと思われる。

図5に回転数 3000rpm でスポット FSP したマイクロ組織を示す。図5(a),(b)は保持時間 2s、押込深さ 0.5mm でスポット FSP したマイクロ組織、(c),(d)は保持時間 2s、押

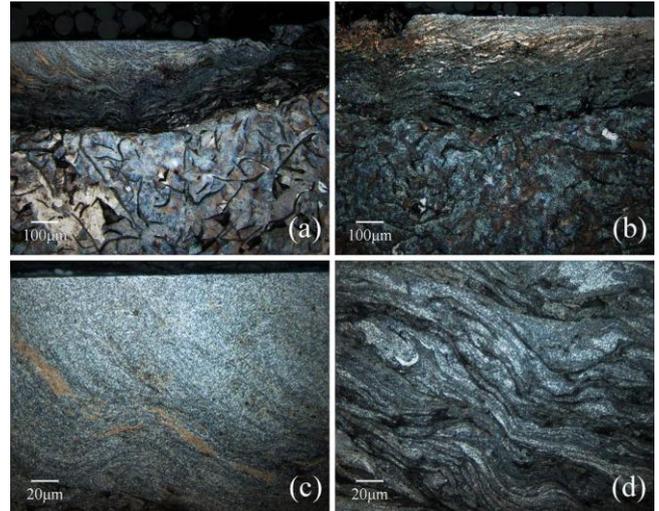


図4 回転数 1000rpm、押込深さ 0.6mm でスポット FSP したマイクロ組織、(a)保持時間 2s, (b) 保持時間 4s, (c)(a)の最表面側, (d)(a)加工領域下部

込深さ 0.6mm、(e),(f)は保持時間 6s、押込深さ 0.6mm で加工したものである。図5(a),(b)の試料では、片状黒鉛が微細化された領域は剥離してしまっており、茶色の熱影響領域が観察された。基地組織と熱影響部の境界を拡大した図5(b)を見ると、基地のパーライト組織は白いファライト相と黒いセメンタイト相が層状になっているが、熱影響部ではこの層状が崩れ、粒状になっている。また、基地中に存在している片状黒鉛がほぼそのまま残っており、機械的な攪拌は行われておらず、摩擦熱の影響で組織が変化したのが分かる。この熱影響部の硬さは、約 800HV と著しく向上していた。図5(c),(d)の組織は図3(d)の試料と同じ物であり、基地組織の上に茶色の熱影響部があり、その上に黒鉛が微細化された青い領域も約 150µm 程度存在していた。しかし、この攪拌領域と熱影響部との境界にはクラックもしくは黒鉛の黒い筋がはっきりと確認され、容易に剥離することが予想される。これらの領域の硬さを調べたところ、青い攪拌領域では約 640HV、その下の熱影響部では約 870HV となっており、最表面の攪拌領域より、その内部の熱影響部の方が硬くなっていた。図5(e),(f)の試料では、最表面に白い変質層が最大で約 400µm 程度存在していた。またこの変質層内の片状黒鉛は、図4(d)のように筋状に変形してはいないものの、内部の片状黒鉛よりは細くなっていた。これは、摩擦熱によりカーボンが鉄基地中に拡散したため細くなったものと考えられる。このカーボンが基地中に拡散・固溶したことで図5(f)のように組織が変化したと思われる。この白い相の硬さは約 630HV と基地パーライト相よりは硬化しているが、図5(a),(b),(c)の熱影響部よりは硬度が低かった。また、この白い相が何であるかは分からなかった。

図6に回転数 3000rpm、移動速度 100mm/min、押込深さ 0.3mm、前進角 3° でライン FSP を行った試料の

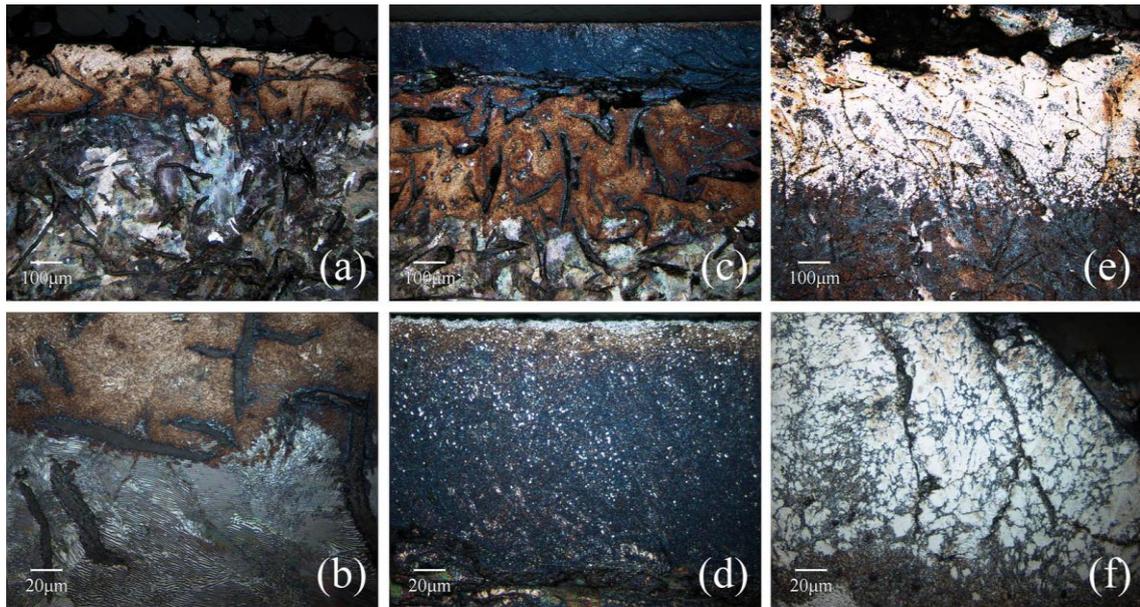


図5 回転数 3000rpm でスポット FSP したマイクロ組織、
(a),(b)保持時間 2s, 押込深さ 0.5mm, (c)(d)保持時間 2s, 押込深さ 0.6mm, (e)(f)保持時間 6s, 押込深さ 0.6mm

外観写真を示す。図中左側が開始点であり、右側が終了点である。ツールを素材に押し込んでいるため移動した痕跡が溝状にえぐられており、波状の加工痕も残っている。図7に移動速度 100mm/min で 30mm のライン加工を行った横断面のマクロ組織を示す。図7(a)は回転数 2000rpm で加工した場合、図7(b)は回転数 3000rpm の場合であり、移動距離の中心部の横断面となっている。いずれも図3(d)のような黒鉛微細化した領域は観察されず、茶色の熱影響部のみ観察された。この2つの熱影響部の深さを比較すると、上述のスポットの時と同様に、回転数が大きい方が摩擦熱が大きいので、図7(a)の約 140µm から図7(b)では約 280µm と2倍になっていた。図8はこの2つの試料の縦断面のマクロ組織を示す。いずれも加工終了点付近の組織となっており、図8(a)の 2000rpm は右から左、図8(a)の 3000rpm は左から右へツールが移動したものである。この近辺では、熱影響部の深さはやや波打っているもののほぼ一定の深さとなっている。図9にそれぞれの試料の開始点付近と終了点付近のマイクロ組織を示している。開始点付近では図9(a)の 2000rpm でも図9(c)の 3000rpm でも熱影響部の深さは浅いが、それぞれ図9(b),(d)の終了点付近では深くなっている。FSP 加工開始時はツールも試料も温度が低い



図6 回転数 3000rpm、移動速度 100mm/min でライン FSP を行った試料の外観



図7 100mm/min で FSP を行った横断面マクロ組織、
(a)回転数 2000rpm, (b)回転数 3000rpm

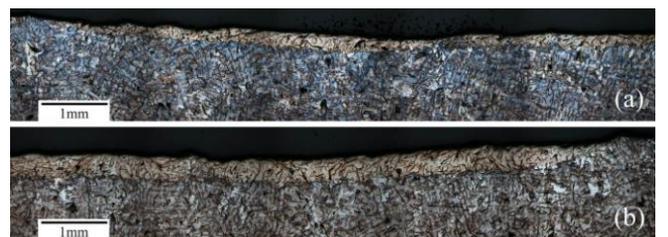


図8 100mm/min で FSP を行った縦断面マクロ組織、
(a)回転数 2000rpm, (b)回転数 3000rpm

ため熱影響が小さいが、ツールを移動させる間に摩擦熱が蓄積されていくため、熱影響部が徐々に深くなっていたと考えられる。ライン加工開始時の保持時間を十分に取れば、この熱影響部の深さの変化を小さくできると考えられる。この熱影響部の組織はスポット FSP の図5(b)と同様であることから、硬さも同様で約 800HV となっていた。これらの結果より、回転数 3000rpm、押込深さ 0.3mm、100mm/min でライン加工すれば、表面が荒れるものの、300µm 近い硬化層を作ることができる。

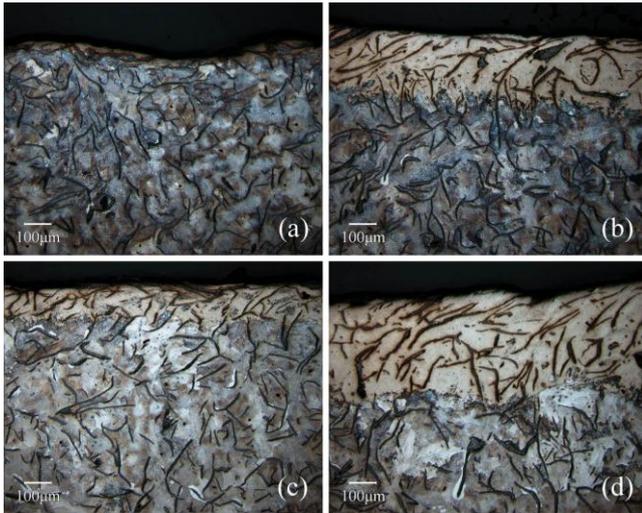


図9 100mm/min で FSP を行った縦断面のマイクロ組織、
回転数 2000rpm : (a)開始点付近, (b)終了点付近
回転数 3000rpm : (c)開始点付近, (d)終了点付近

ツールの移動速度を遅くすれば単位体積あたりの熱量が増えるため、熱影響部をより深くすることができる可能性もある。

4. まとめ

片状黒鉛鋳鉄(FC250)の表面硬化に、摩擦攪拌プロセス(FSP)を適用し、スポット加工とライン加工の2種類の加工を行った。

スポット加工では、摩擦攪拌により片状黒鉛が微細化された領域と、摩擦熱によりパーライト組織が変化した熱影響部が観察されるものがあったが、黒鉛が微細化された領域は剥離しやすいものであった。また摩擦熱が大きい条件では、片状黒鉛が細くなった不明な組織も観察された。これらの組織の硬さは、黒鉛微細化領域は約640HV、熱影響部は約800HV、不明な組織は約630HVといずれも基地のパーライト組織(約250HV)より硬化していた。

ライン加工では、熱影響部のみが確認され、その深さは加工し始めから終了地点に向けて深くなっていた。FSP加工開始時は温度が低いため熱影響が小さいが、ツールを移動させる間に摩擦熱が蓄積されていき、熱影響部が徐々に深くなっていったと考えられる。

【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) 権湧幸, 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) 斎藤尚文, 権湧幸, 重松一典: まてりあ, 43 (2004), 592.
- 4) 山口泰文, 藤井英俊, 木口昭二, 野城清: 鋳造工学, 80 (2008), 15.
- 5) 藤井英俊: 軽金属, 57 (2007), 499.

Abstract

Hardening of the cast iron (FC250) surface was demonstrated by using FSP (Friction Stir Processing) technique. Two processing methods of the FSP, spot type and line type, were tried. In the case of spot type FSP, the stirring zone that flaky graphite was refined, and the heat-affected zone that pearlite structure was affected, was often observed in some specimens. For the line type FSP, only the heat-affected zone was observed. Thickness of the heat-affected zone was increased by increment of the frictional heat. Hardness of the heat-affected zone was about 800HV, though hardness of the initial pearlite structure was about 250HV.