

摩擦攪拌プロセスによる鋳鉄の表面改質

水谷 予志生、細野 幸太、足立 隆浩

Surface Modification of Cast Iron by using Friction Stir Process

Yoshiki Mizutani, Kota Hosono and Takahiro Adachi

摩擦攪拌プロセス(Friction Stir Processing : FSP)を片状黒鉛鋳鉄(FC250)と球状黒鉛鋳鉄(FCD450, FCD700)の表面改質に適用した。大面積の加工への対応を想定し、ツール径を $\phi 8\text{mm}$ と $\phi 16\text{mm}$ の二種類について、面積の違いによる影響を調べた。また、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・硬さとの関係についても調べた。いずれの試料もFSP加工により、母材硬度が180~320HVから600~850HVへと硬化がみられた。材種の違いでは、素地組織がフェライトのFCD450より、パーライト組織であるFC250とFCD700の方が硬化層は深くなった。また、ツール径 $\phi 8\text{mm}$ では、回転数・移動速度を増加させると硬化層は深くなるが、 $\phi 16\text{mm}$ では移動速度を増加させるとやや浅くなった。FC250とFCD700の硬化層の深さは、 $\phi 8\text{mm}$ ツールで最大で約600 μm だったのに対し、 $\phi 16\text{mm}$ ツールでは約1.5mm程度が得られた。

1. はじめに

鉄鋼材料の耐摩耗性を向上させるために、高周波焼き入れや浸炭焼き入れ、窒化など、様々な方法があり、状況に応じて最適なものが選ばれている。鋳鉄の表面硬化は、現場で簡便にできることから、バーナー等で表面を加熱する火炎焼き入れが行われている。しかし、この手法は、作業者に依存するため、品質が安定しないことも多い。そこで、機械加工的な手法による表面改質法として、摩擦攪拌プロセス(FSP)が注目されている。

FSPとは、摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding : FSW)技術を応用し、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による強歪みによってワーク表面の改質を行う技術である。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材料への応用^{6~10)}も研究され始めている。鉄鋼材料への応用の場合、ツールが摩擦している部分のみ局所的に急速加熱され、通過後には急冷されるため、焼き入れの効果が期待できる。また、高周波焼き入れのような従来の手法と比べ、入熱量が小さいため歪みを小さく抑えることができると想定される。そこで、FSPを鋳鉄に応用し、安定的な表面硬化法を開発することを目的とした。

著者等は以前の研究で、 $\phi 8\text{mm}$ のピン無し超硬ツールでねずみ鋳鉄(FC250)の表面をFSP加工し、加工条件(移動速度、ツール回転数)とマイクロ組織・硬さへの影響を調べた¹¹⁾。その結果、回転数を2000rpm以上にするとパーライト組織がマルテンサイト化し、約250HVの硬さであった素材が、600~800HVに硬化させることができた。また、回転数・移動速度を増加させると加工部の温度が高くなり、硬化層が深くなるという結果も得ている。しかし、 $\phi 8\text{mm}$ のツールでは範囲が狭く、深さも最大で約600 μm の硬化層しか得られないため、より広範囲な領域

を一度で改質できるのが望まれる。

本研究では、ツール径を大きくした時のFSP加工条件と加工時の温度、マイクロ組織や硬さへの影響を調査・比較した。また、ねずみ鋳鉄だけでなく、球状黒鉛鋳鉄(FCD450, 700)についても同様のFSP加工を行い、硬化領域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)、球状黒鉛鋳鉄(FCD450, 700)を板厚5mmに研削加工し、FSP用試料とした。FSPには位置制御方式である自動摩擦溶接機(株)日立設備エンジニアリング社製、SHH204-718型)を用いた。FSP用ツールには超硬材料を用いており、 $\phi 8\text{mm}$ と $\phi 16\text{mm}$ を用いた。FSPではこのツールが進行方向後方に3°傾けて、ツール面全体をワークと摩擦させるために、 $\phi 8\text{mm}$ では0.45mm、 $\phi 16\text{mm}$ では0.85mm押し込むこととした。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、サーモビューア(株)アピステ製、FSV-1100-H16)による温度測定も行った。

3. 結果及び考察

図1にツール径を $\phi 8\text{mm}$ と $\phi 16\text{mm}$ でFCD700をFSP加工している時のワークとツールの様子を示す。いずれも移動速度は100mm/minであり、上段は $\phi 8\text{mm}$ 、下段は $\phi 16\text{mm}$ で、回転数は左から2000、3000、4000rpmである。 $\phi 8\text{mm}$ の場合回転数が増加するにつれツール先端が赤熱してくるが、 $\phi 16\text{mm}$ の場合回転数によらずほぼ同じような明るさになっている。また、いずれもツール通過後のワーク表面が赤熱することはなかったことから、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。サーモビューアによる加工中

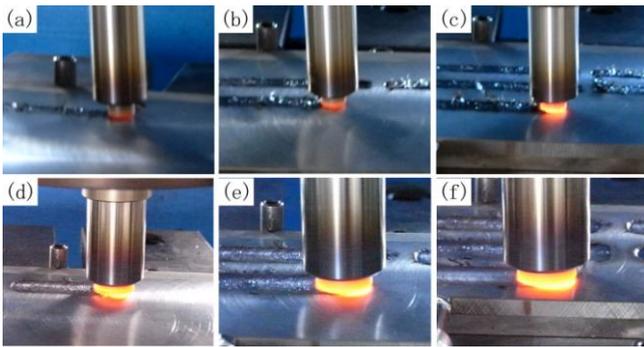


図1 FSP 加工中のワークとツールの様子
(ワーク：FCD700、移動速度：100mm/min、
ツール径：上段φ8mm、下段φ16mm、
回転数：左 2000rpm、中 3000rpm、右 4000rpm)

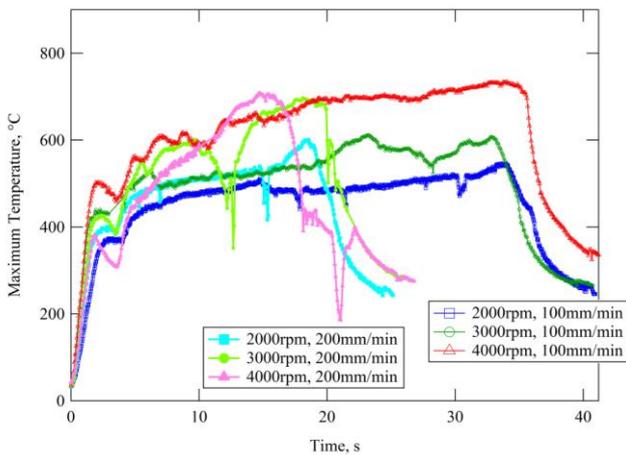


図2 FCD700 をφ8mm ツールでFSP 加工した場合の温度変化に及ぼす移動速度と回転数の影響

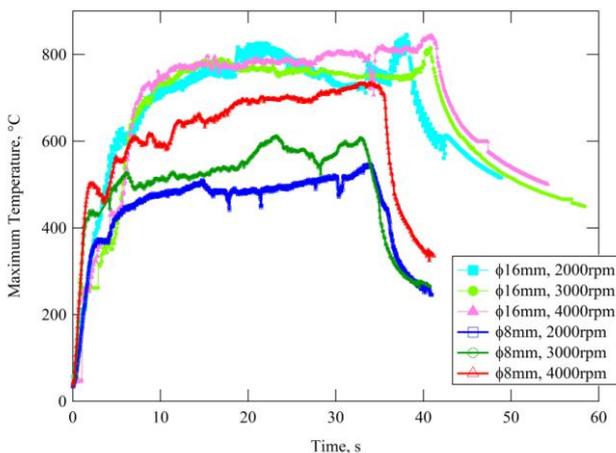


図3 FCD700 を移動速度 100mm/min でFSP 加工した場合の温度変化に及ぼすツール径と回転数の影響

のツールとワークの最高温度測定結果を図2、3に示す。
図2に FCD700 をφ8mm ツールで FSP 加工した場合の

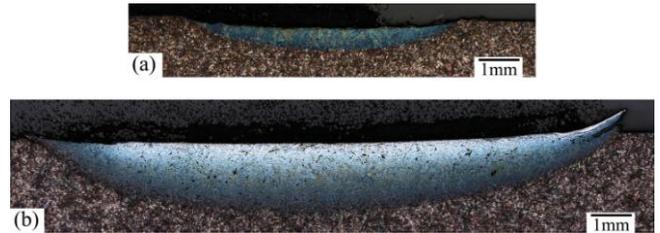


図4 FSP 後の FC250 のマクロ組織、(a)φ8mm、
(b)φ16mm、(回転数：4000rpm、移動速度：100mm/min)

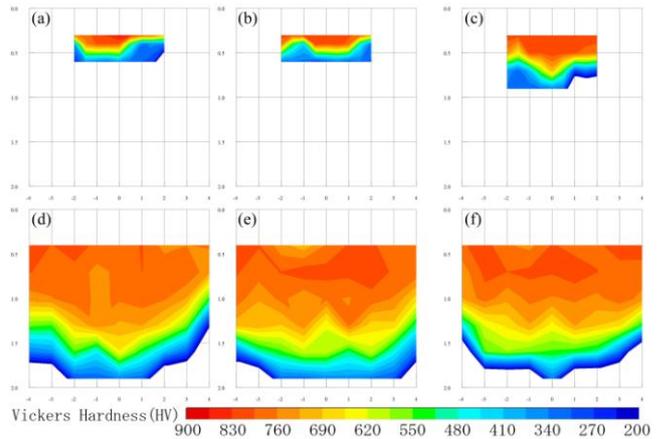


図5 FCD700 に 100mm/min でFSP 加工した断面の硬さに与えるツール径と回転数の影響、
(ツール径：上段φ8mm、下段φ16mm、
回転数：左から 2000、3000、4000rpm)

温度変化に及ぼす移動速度と回転数の影響を示している。
FSP 加工を行うと、ツールで削られて繋がった切粉が高温になっている加工部周辺を覆ってしまうことがある。このような場合、実際の温度よりサーモビューアによる測定温度が低くなるため、図2のグラフではたびたび温度が低下しているが、実際には温度が持続的に上昇していると考えている。移動速度 100mm/min の場合、回転数を 2000 から 3000、4000rpm へと増加させるにつれ、最高到達温度は明らかに上がっている。一方、移動速度 200mm/min の場合、回転数を 2000 から 3000 rpm へ変えた場合の変化は大きい、3000 から 4000 rpm へはそれほど大きくない。また図2から、最高温度は 700 ~ 730°C程度で飽和すると思われる。図3は、ツール径が温度変化に及ぼす影響を示している。上述のように、φ8mm では回転数の増加に対して最高到達温度も上昇していたが、φ16mm ではその影響はほとんど見られない。また、φ8mm では時間の経過と共に温度が上昇していたが、φ16mm では加工開始後すぐに 800°C近くまで上がり、その後ほぼ一定の温度になっている。本実験では、ツール径を大きくすると加工面積だけでなく、周速、押し込み深さも変わってくるが、回転数にかかわらず、最高到達温度が高くなり、到達時間も早い傾向にあることが分かった。

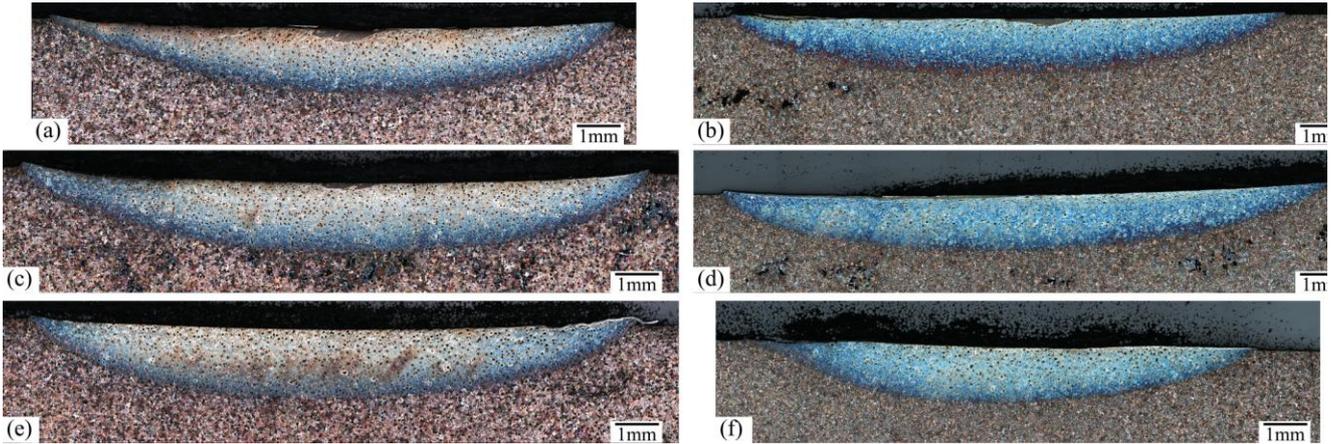


図6 φ16mm ツールで FSP 加工した FCD700 のマクロ組織、
(移動速度：左 100mm/min, 右 200mm/min、回転数：上から 2000, 3000, 4000rpm)

ツール径φ8mm とφ16mm で FSP 加工した FC250 の断面のマクロ組織を図4に示す。FSP 加工条件は、回転数 4000rpm、移動速度 100mm/min である。どちらのツール径でも素地組織が変化した改質領域が三日月状にできており、ツール径が大きくなると幅だけでなく深さも大きくなっている。この領域の硬さをマイクロビッカースにより、φ8mm の場合は横 0.5mm、深さ 0.2mm 間隔で、φ16mm の場合は横 1mm、深さ 0.3mm 間隔で測定し、図5のような硬度分布図を作成した。図5は FCD700 の一例として、移動速度 100mm/min で FSP 加工した時のツール径と回転数の影響を示す。いずれも母材の組織はパーライトで約 320HV の硬度であったのに対し、改質部では 600~800HV 以上の硬さとなっており、硬化しているのが分かる。また、上段のφ8mm の場合は回転数が大きくなるにつれ、硬化部の深さが大きくなっているが、下段のφ16mm の場合はほとんど変化がない。この結果は、図3の温度測定の最高到達温度の変化とよく一致する。硬化部の深さは、φ8mm では最大のもので約 600μm だったのに対し、φ16mm のツールではいずれも約 1.5mm 程度が得られた。

次に、φ16mm のツールで FSP 加工した場合の改質領域に及ぼす移動速度と回転数の影響を調べた。図6に FCD700 の場合のマクロ組織を示す。以前のφ8mm のツールの場合は、移動速度と回転数の増加に伴い改質領域も深くなっていった¹¹⁾が、本研究のφ16mm のツールの場合はそれほど顕著な影響は見られなかったものの、移動速度が速い方がやや浅くなっている。これは、移動速度が速い場合、試料内部まで十分熱が伝わる前にツールが通過してしまうことが起因していると考えられる。

材種の違いによる硬化領域の大きさを調べるために、φ16mm ツールで回転数 3000rpm で FSP 加工した FC250, FCD450, FCD700 のそれぞれのビッカース硬度分布図を図7に示す。ここでは移動速度の影響も一緒に示している。素地組織がパーライトである FC250 と FCD700 の硬

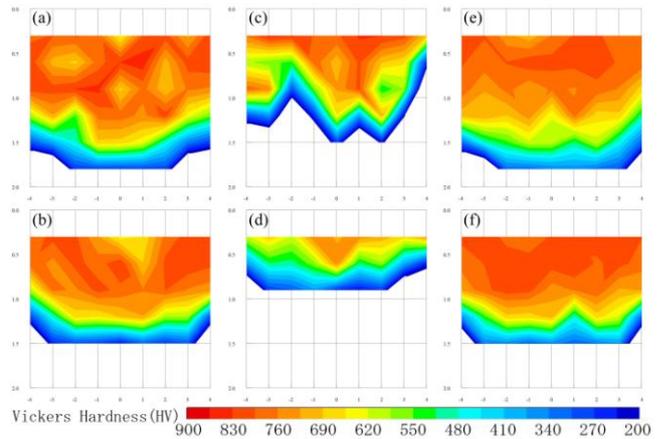


図7 φ16mm ツールで FSP 加工した各種鋳鉄の硬さ分布図、(回転数：3000rpm、移動速度：上段 100mm/min、下段 200mm/min、材種：左から FC250, FCD450, FCD700)

化領域はほとんど同じ大きさであるのに対し、素地組織の大部分がフェライトである FCD450 では浅い領域しか硬化していない。フェライト組織のオーステナイト化は、一旦 A3 変態点以上に加熱する必要があり、フェライト基の組織である FCD450 を硬化させるには加熱温度が不足すると考えられる。それでも 300μm~1mm 程度の領域で母材の硬度(約 190HV)より高い 500~800HV の硬さが得られた。また、いずれの材種でも移動速度が速くなると硬化領域が若干浅くなる傾向があった。

それぞれの材種について、φ16mm のツールで FSP 加工したもののマイクロ組織を図8に示す。左からそれぞれ硬化部の全体像、表面近傍、硬化部中央、硬化部と素地との境界付近を、一番右には素地の組織を比較として示している。素地組織は、FC250 では片状黒鉛+パーライト、FCD450 では球状黒鉛+フェライト+少量のパーライト、FCD700 では球状黒鉛+パーライトとなっているのが分かる。これを FSP 加工すると、パーライト組織部分がマルテンサイト化する。特に、表面側では粗大なレンズマルテンサイトになっているのが分かる。

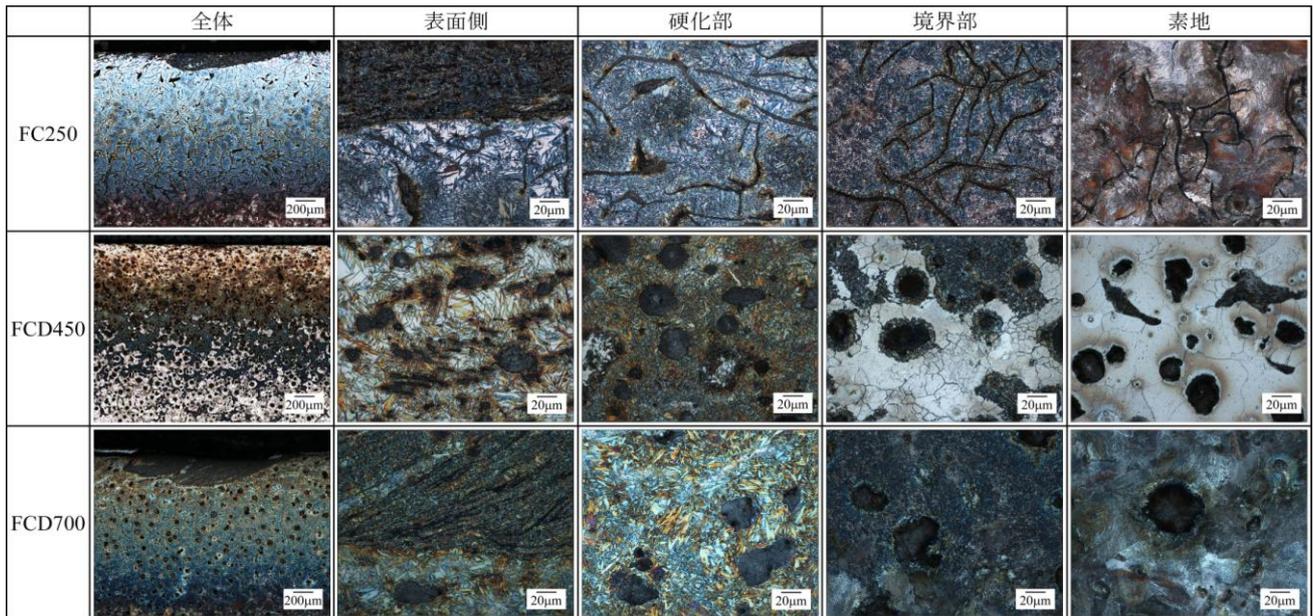


図8 φ16mm ツールで FSP 加工した各種鋳鉄のミクロ組織、(加工条件は、FC250 : 4000rpm, 200mm/min、FCD450 : 4000rpm, 100mm/min、FCD700 : 2000rpm, 200mm/min)

ここまで粗大なレンズマルテンサイトはφ8mm ツールでは観察されておらず、加熱温度が影響していると考えられる。また、FC250 と FCD700 の一部の試料では、最表面の中心部付近に黒鉛まで微細化された組織や、黒鉛が伸びた組織が観察された。このような組織は、ツールの回転による塑性流動の影響で得られたと考えられる。FCD450 の硬化部と素地の境界付近では、球状黒鉛の周りをマルテンサイトが覆っていることから、炭素が拡散してマルテンサイト化したと考えられる。また、その周りのフェライト組織には、素地のフェライト粒より微細なものも観察された。なおツール径がφ8mm の場合、上述の粗大なレンズマルテンサイト以外、ほぼ同様な組織が観察されている。FSP のツール径を大きくすることで、広い範囲(面積、深さ)でマルテンサイト組織が得られ、硬化領域を拡大させることができた。耐摩耗部材への応用が期待できるため、摩耗特性の評価が今後の課題である。

4. まとめ

片状黒鉛鋳鉄(FC250)および球状黒鉛鋳鉄(FCD450, FCD700)に摩擦攪拌プロセス(FSP)を適用し、表面硬化に及ぼすツール径の大きさや加工条件の影響を調べた。

- 1)サーモビューアによる加工中の温度測定から、ツール径がφ16mm の場合は、加工条件によらず早期にほぼ一定の最高到達温度になっており、φ8mm の場合より高温になった。
- 2)FSP 加工した断面を観察すると、パーライトまたは、フェライトの素地組織からマルテンサイトに変化した領域が観察された。ツール径を大きくすることで、この改質領域を広く、深く拡大させることができた。

- 3)φ16mm ツールで FSP 加工したものの断面の硬さ分布測定結果から、パーライト素地である FC250(母材硬度 : 約 280HV)と FCD700(母材硬度 : 約 320HV)は、600~850HV の硬化領域が最大で 1.5mm 程度得られた。一方、素地の大部分がフェライトである FCD450(母材硬度 : 約 190HV)の場合は 0.5~1mm 程度しか得られなかった。
- 4)素地がフェライトである FCD450 では、球状黒鉛から炭素が拡散することでフェライトがマルテンサイト化していた。
- 5)φ16mm ツールの場合、摩擦部の温度は回転数や移動速度によらずほぼ一定であったため、移動速度が遅い方が試料内部まで加熱され、硬化領域が深くなったと考えられる。

【参考文献】

- 1)権湧ら, 日本金属学会誌, 66, p1325, 2002
- 2)佐藤ら, までりあ, 42, p214, 2003
- 3)Y.J.Kwon et al., Scripta Mater., 49, p785, 2003
- 4)斎藤ら, までりあ, 43, p592, 2004
- 5)水谷ら, 岐阜県産業技術センター研究報告 No.1, p64, 2007
- 6)山口ら, 鑄造工学, 80, p15, 2008
- 7)藤井英俊, 軽金属, 57, p499, 2007
- 8)河内ら, 鑄造工学, 82, p337, 2010
- 9)今川ら, 鑄造工学, 82, p674, 2010
- 10)今川ら, 鑄造工学, 83, p733, 2011
- 11)水谷ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No.4, p13, 2011