

# 脱炭処理した球状黒鉛鑄鉄と オーステナイト系ステンレス鋼との摩擦攪拌接合

岩手大学大学院工学研究科 晴山 巧 阿部安奈  
大阪大学接合科学研究所 藤井英俊 森貞好昭

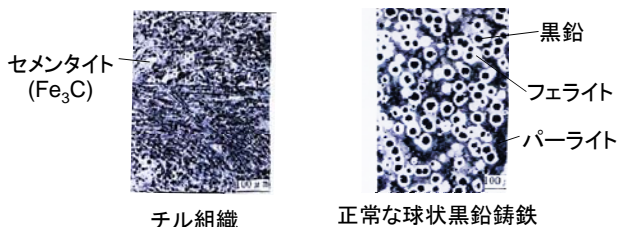
**球状黒鉛鑄鉄**は、強度、韌性に優れた安価な材料であり、種々の形状の製品がニアネットシェイプで製造できるため、用途も自動車、鑄鉄管、一般機械部品等非常に多岐に渡っている。しかし、耐食性、耐摩耗性等についてはステンレス鋼や高合金鋼等といった材料の方が優れている。そのため、球状黒鉛鑄鉄と異種材料を**複合化**することで鑄鉄材料にない特長を補う上に、従来の鉄鋼材料を使用している製品の低コスト化や軽量化も可能である。

**摩擦攪拌接合**は従来の熔融溶接とは異なり、母材の融点以下で接合可能な固相接合法である。しかし、球状黒鉛鑄鉄に摩擦攪拌接合を行うと、黒鉛変形層が生成し、先端に応力集中が起こり、破断の原因につながる。

そこで、本研究では、球状黒鉛鑄鉄の表面に**脱炭**を施し、ツールのプローブ長と入熱量を変化させることで、黒鉛変形層を形成せずに接合が可能か検討する。

## 鑄鉄の溶接性

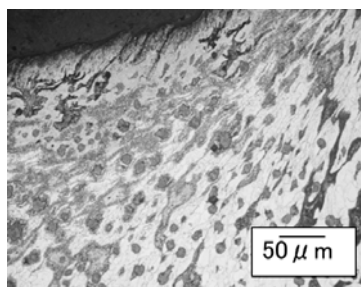
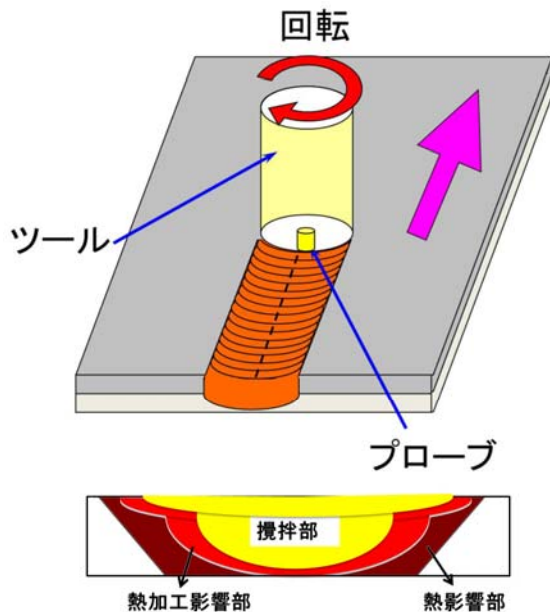
鑄鉄は難溶接材である。鑄鉄を溶接すると、急速に加熱・冷却され、右図のような**チル化**が生じる。チル相は非常に硬くて脆い組織であるため、加工性が著しく悪化する。



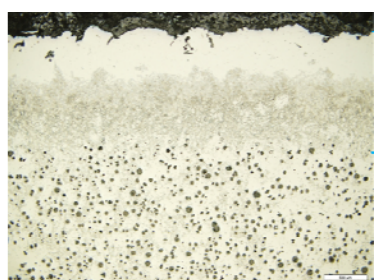
## 摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding)とは

ツールと呼ばれる工具を高速回転させながら材料と接触させ、材料との摩擦熱を利用した固相接合法である。

接合部断面は右図のような構造になる。接合部中央が**攪拌部**と呼ばれる再結晶組織が存在する。外側には塑性変形により結晶粒が伸びた**熱加工影響部**、その外側には、塑性変形は受けていないが、熱の影響を受けた**熱影響部**が存在する。



鑄鉄が塑性変形を受け、球状黒鉛の変形が多数認められる



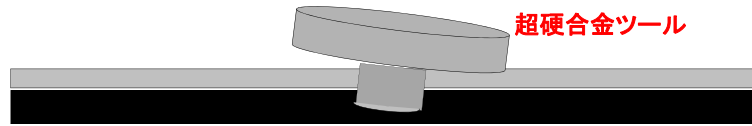
脱炭処理を施した鑄鉄の断面組織 (本研究で用いた供試材)

球状黒鉛鑄鉄にFSWを行うと、球状黒鉛が変形する。この材料に外力を加えると、黒鉛の先端に応力が集中し、破断の起点となるため、接合強度が低下する。そこで、球状黒鉛鑄鉄のツール挿入範囲に脱炭処理を行い、FSWを行うことで、黒鉛の変形による強度低下を防止する。

# 実験方法

## 重ねFSWの条件

使用ツール: 超合金ツール  
 プローブ長: 1.6mm, 2.0mm  
 ツール傾斜角: 3°  
 荷重: 1.6ton  
 回転数: 200~400rpm  
 接合速度: 25~150mm/min  
 SUS板厚: 1.5mm  
 FCD板厚: 3mm



超合金ツール

SUS304  
FCD450-10

## 評価方法

外観観察  
 組織観察  
 ビッカース硬さ試験  
 引張せん断試験

## 供試材の機械的性質

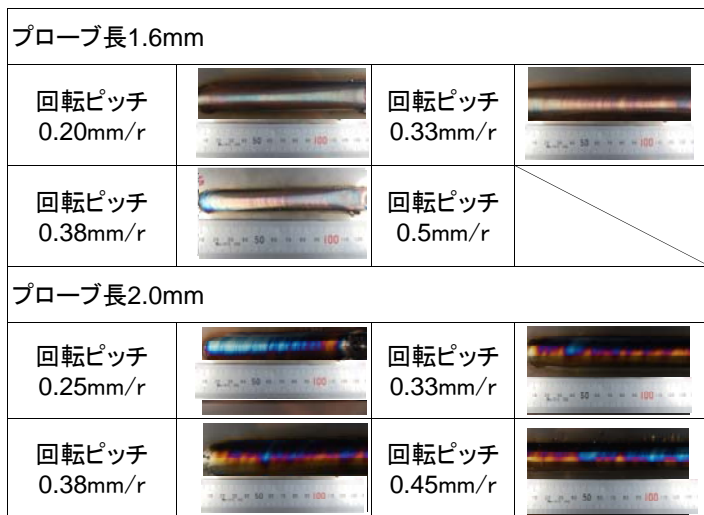
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Cr
FCD450-10	3.56	2.55	0.21	0.017	0.005	0.039	—	—
SUS304	0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下	—	8.00~10.50	18.00~20.00

## 供試材の化学成分

	引張強さ(MPa)	伸び(%)	ブリネル硬さ(HB)
FCD450-10	465	24	153
SUS304	520以上	40以上	200以下

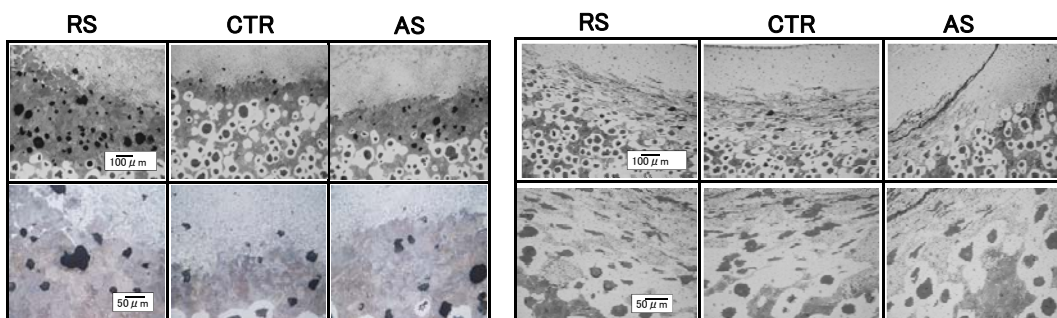
# 実験結果

## (A) 外観観察



プローブ長1.6mmにおいて、回転ピッチ0.20mm/r未満では、入熱量が過剰になり、材料が軟化しツール挿入量が増え接合不可能であった。回転ピッチ0.50mm/rでは入熱量が少ないため、ツールが挿入されず接合不可能であった。  
 プローブ長2.0mmにおいて、回転ピッチ0.20mm/r以下ではプローブ長1.6mmと同様に入熱量過剰のため接合不可能であった。0.50mm/rも1.6mmと同様に入熱量不足のため接合不可能であった。  
 今回接合が可能であった条件に関してはバリが少なく、外観上の欠陥は見当たらなかった。

## (B) ミクロ組織観察

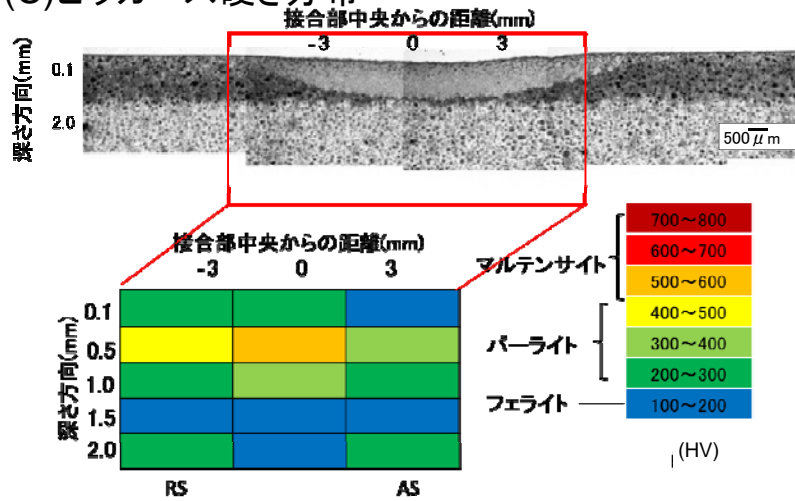


(プローブ長1.6mm, 回転ピッチ0.38mm/r)

(プローブ長2.0mm, 回転ピッチ0.38mm/r)

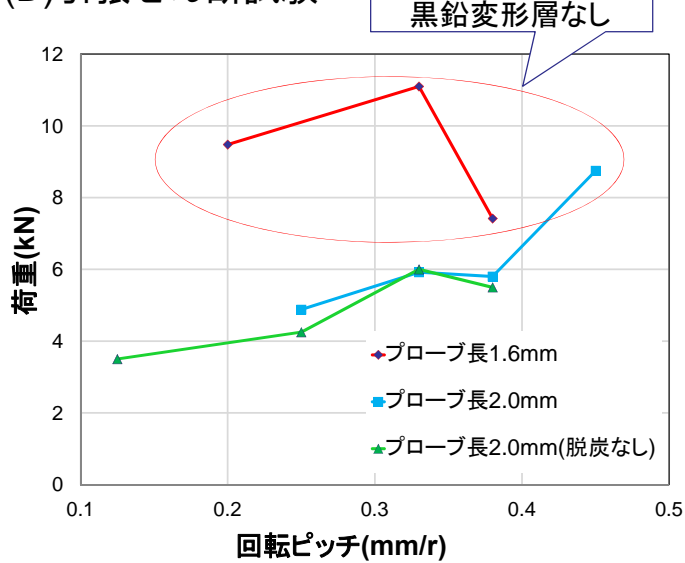
プローブ長1.6mmでは黒鉛変形層が発生しなかった。  
 プローブ長2.0mmでは、黒鉛変形層が確認された。しかし、入熱量の低い回転ピッチ0.45mm/rの条件では黒鉛変形層が発生しなかった。

### (C) ビッカース硬さ分布



今回FSWを行ったすべての条件で、硬さの増加が見られた。プローブ長1.6mm, 回転ピッチ0.33mm/rの条件を試料ではCenter部でHV500~600程度の硬さを示している。この領域では、マルテンサイトが確認できた。これは入熱量が最大となるFSWプロセス中にオーステナイト領域まで温度上昇した後、急激な温度降下があったものと推測される。

### (D) 引張せん断試験



黒鉛変形層が発生した試料は強度が低下し、発生していないものは強度が大きい。

プローブ長2.0mmでは、脱炭層を貫通し鋳鉄母材が攪拌され黒鉛変形層が形成された。回転ピッチ0.45mm/rの条件でのみ、高い強度になった要因は、入熱量が低下したため、材料が軟化せず、ツール挿入量が適切になることで、脱炭層を超えることなく接合でき、黒鉛変形層が形成されなかったためと考えられる。

黒鉛変形層の形成が強度低下の主要因となる。また、過去の脱炭なし試料の実験結果(プローブ長2.0mm)と比較すると、黒鉛変形層が発生していない試料に関しては2倍以上の強度を示した。

### 想定される用途

自動車部品における鋳造品分野、鋳造・金属部品の軽量化による燃費の向上、環境負荷軽減を想定している分野。特に自動車部品には一体成形により軽量化が可能で、次世代自動車産業の寄与は大きく、経済的効果は極めて大きい。

### 実用化について

シンプルな形状での基礎実験は終えている。実用性のある複雑な形状で本技術を適用することで、実用化の課題抽出、接合する金属のニーズが必要である。

### 論文

- (1) 晴山、藤井ら: 高けい素球状黒鉛鋳鉄とSUS304との重ね摩擦攪拌接合における接合部のマイクロ組織、*鋳造工学*83(2011)336-342
- (2) 晴山ら: 高けい素球状黒鉛鋳鉄とオーステナイト系ステンレス鋼との重ね摩擦攪拌接合、*鋳造工学*82(2010)337-343

### 口頭発表

- (1) 晴山、藤井ら: 摩擦攪拌プロセスによる球状黒鉛鋳鉄の組織変化、*日本鋳造工学会第159回全国講演大会*(2011)
- (2) 晴山、藤井ら: 超硬合金ツールを用いた高けい素球状黒鉛鋳鉄とオーステナイト系ステンレス鋼との摩擦攪拌接合、*日本鋳造工学会第156回全国講演大会*(2010)
- (3) 晴山、藤井ら: 超硬合金ツールを用いた高けい素球状黒鉛鋳鉄とフェライト系ステンレス鋼との摩擦攪拌接合、*日本鋳造工学会第157回全国講演大会*(2010)
- (4) 晴山ら: 高けい素球状黒鉛鋳鉄とオーステナイト系ステンレス鋼との摩擦攪拌接合特性に及ぼす接合条件の影響、*日本鋳造工学会東北支部第80回鋳造技術部会*(2010)
- (5) 晴山ら: 高シリコン球状黒鉛鋳鉄とオーステナイト系ステンレス鋼との摩擦攪拌接合、*日本鋳造工学会第154回全国講演大会*(2009)

### 特許

晴山、藤井、森貞: 「鋳鉄材の接合方法及びそれにより得られる接合部材」

### 日刊工業新聞掲載

**摩擦攪拌で接合容易**  
**黒鉛の破碎・変形を抑制**  
**脱炭処理で強度母材並み**

「摩擦攪拌接合」を用いた鋳鉄の異材接合のイメージ

6U5304  
FCD450