

固溶強化した球状黒鉛鑄鉄の切削性評価

服部 俊*, 村川 悟*, 樋尾勝也*

Evaluation of Machinability on Solid-Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron

Suguru HATTORI, Satoru MURAKAWA and Katsuya HIO

Solid-solution strengthened ferritic ductile iron is known as one of the new ductile cast iron grades. It is made by solid-solution strengthening of ferritic matrix with higher silicon contents around 4%, and shows both of high tensile strength and elongation. We found out a further merit of the ductile iron in machinability by the experiment of cutting three grades of ductile iron blocks.

Key words: Solid-Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron, Matrix, Chip Wear, Cutting Resistance, Surface Roughness

1. はじめに

球状黒鉛鑄鉄の機械的性質は、金属組織中の基地組織の相および黒鉛の形状に影響される。近年では、低コスト化および軽量化という市場要求から、高い強度特性と延性を両立する鑄鉄材料の開発が進められている。特に、フェライト基地にけい素を固溶強化した球状黒鉛鑄鉄（以下、固溶強化鑄鉄と呼ぶ）は、強度を高める手法として注目されている。例えば、けい素の配合比を約 4.3 mass% とすれば、従来のフェライト鑄鉄に相当する延性およびパーライト・フェライト鑄鉄に相当する強度、また両者よりも高い耐力比が得られるとする報告¹⁾がある。

固溶強化鑄鉄は、海外では ISO 1083 : 2004, EN 1563 : 2011 などにより規格化されており、自動車や産業機械における構造部材などへの適用²⁾も進む。一方、国内でもその物性についてさまざまな検討³⁾がなされている。弊所でも、けい素の配合量および合金元素の含有の影響を調査した⁴⁾。

固溶強化鑄鉄の特徴は、熱処理や、銅ほか多くの合金原料の添加といった高コストな手法を用いないことである。また、ミクロ的には、固溶強化された

フェライト単相であり、パーライト相など局所的に偏析した炭化物が生成しない。同時に、マクロ的には、けい素のもつ溶湯中の炭素の黒鉛化（チル化抑制）作用⁵⁾により急冷されやすい薄肉部でも粗大な炭化物の生成を抑え、硬さが上昇しにくい。これらのように、マクロ・ミクロの両面で鑄造品中の硬さの変動は従来鑄鉄に比べ著しく小さいと推測され、それを実証した報告⁶⁾もある。このことは同時に、固溶強化鑄鉄の切削性の良さを示唆しているが、これについては工具摩耗の報告⁷⁾などにとどまり、切削性について、切削抵抗など他の観点での評価を試みた報告は少ない。

ここでは、固溶強化鑄鉄の切削性を評価する目的で、鑄造および切削試験を実施した結果を報告する。

2. 実験方法

2. 1 供試材料の溶解

供試材料は、EN 1563 : 2011 における固溶強化鑄鉄 GJS600-10（以下、GJS600）、また比較材料として JIS G 5502 : 2001 におけるフェライト鑄鉄 FCD400-18（以下、FCD400）およびパーライト・フェライト鑄鉄 FCD600-3（以下、FCD600）の 3 種類とした。GJS600 は固溶強化されておりパーラ

* 金属研究室

表 1 供試材料の化学成分 [mass%]

	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
GJS600	3.08	4.34	0.16	0.023	0.003	0.044	-
FCD400	3.95	2.45	0.12	0.022	0.003	0.050	0.006
FCD600	3.75	2.57	0.15	0.026	0.001	0.048	0.450

表 2 加工条件

加工方法	マシニングセンタによる正面フライス加工	
供試体	-形状	Y形供試材 (C号) より切出したブロック (2本)
	-材質	GJS600, FCD400, FCD600 の3種類
使用する工具	-フェイスミル	タンガロイ TPTN12M050B22.0R04 (ϕ 50 mm)
	-チップ	タンガロイ TNGU120707PER-MJ (装着枚数 1枚)
主軸回転速度	900 rpm	
刃あたり送り量	0.05, 0.1, 0.2, 0.3 mm/tooth	
面あたり切込み量	0.5 mm/surface	
切削油	なし	

イト相の無い鑄鉄である。比較する FCD400 は固溶強化されておらずパーライト相の無い鑄鉄であり、基地組織が GJS600 と同等である。FCD600 は固溶強化されておらずパーライト相の影響がある鑄鉄であり、引張強さが GJS600 と同等である。

原料は高純度銑鉄および低 Mn 鋼板、また添加材は Fe-75 %Si および FCD600 のみ Cu を用いた。これらを目的の組成に調整した後、容量 50 kg の高周波誘導炉にて溶製し、1500 °C にて取鍋に出湯した後、直ちに球状化处理と接種処理を行い、1400 °C にて JIS G 5502 : 2001 における Y 形供試材 (C 号) およびノックオフ形供試材 (Kb 形) に注湯した。

なお、供試材料の機械的性質および金属組織の確認のため、ノックオフ形供試材を JIS Z 2241 : 2011 における 4 号試験片に旋盤にて機械加工した後、0.2 %耐力、引張強さ、伸びおよびマクロ硬さ (HBW) を測定した。また、その後、残材にて検鏡試料を作製し、金属組織の観察およびマイクロ硬さ (HV0.1) を測定した。表 1 に代表的な化学組成を示す。

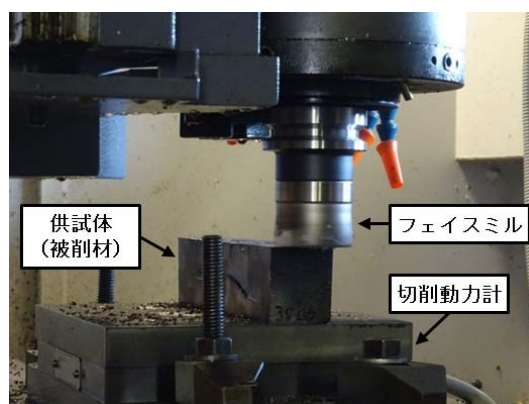
2. 2 切削試験

図 1 に切削試験の概要を示す。

切削試験の供試体は、前節の Y 形供試材の下部を、およそ W40×L200×H45 mm の直方体形状に機械加工し、固定用の貫通穴を空けたものとし、これを各材料に対し 2 本用意した。



a) 切削試験の供試体



b) 正面フライス加工および切削抵抗の測定

図 1 切削試験の概要

切削試験は、マシニングセンタ（森精機株式会社製，SV403）を用い，表 2 に示す加工条件で，新品のチップを用い，同じ材質の供試体を 2 本連続で正面フライス加工を行った．刃あたり送り量 0.1 mm/tooth において切削性を評価するため，加工中の切削抵抗とチップ摩耗，また加工後の供試体の表面粗さ（粗さ曲線）の 3 つの特性を測定した．また，刃あたり送り量を $0.05 \sim 0.3 \text{ mm/tooth}$ で変化させ，加工中の切削抵抗と加工後の供試体の表面粗さを測定した．ここで，特定のチップの摩耗を評価するため，フェイスミルに装着したチップは 1 枚のみとしたが，供試体の切削面に削り残しが無いよう，刃あたり送り量を設定した．

切削抵抗は，供試体の下に固定した切削動力計にて測定し，加工によって供試体を受ける負荷を測定した．また，チップ摩耗については，供試体を数面切削するたびにマイクロSCOPEにて逃げ面の摩耗を観察し，その摩耗幅を測定した．加工後の供試体の表面粗さは，JIS B 0601：2001 および JIS B 0651：2001 に基づき表面粗さ計（株式会社東京精密製，サーフコム 2000SD）にて測定した．

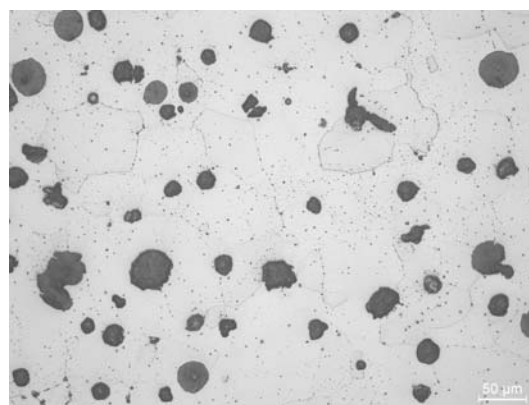
3. 実験結果および考察

3. 1 供試材料の金属組織と機械的性質

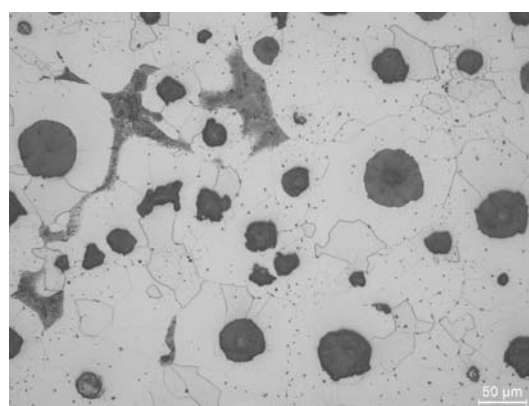
図 2 に供試材料の金属組織を示す．固溶強化鋳鉄 GJS600 はフェライト単相，フェライト鋳鉄 FCD400 はフェライト相に対しパーライト相はごく僅かであり，パーライト・フェライト鋳鉄 FCD600 は両相の混在したブルスアイ組織である．表 3 に，測定した各々の相のマイクロ硬さを併せて，供試材料の機械的性質を示す．図 2 と表 3 より，GJS600 は FCD400 に近い基地組織が観察されるが，フェライト相が固溶強化されていることがわかる．一方，GJS600 を FCD600 と比較すると，GJS600 のフェライト相の硬さは，FCD600 のフェライト相よりは高くパーライト相よりは低いものの，マクロでは近い硬さが得られた．

3. 2 切削試験の結果および考察

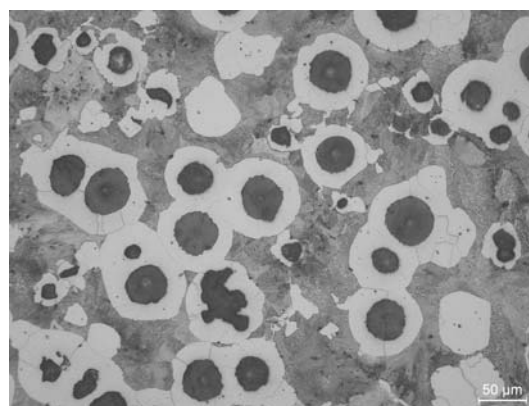
図 3 に切削動力計により得られた供試体の平均切削抵抗を示す．刃あたり送り量に対し平均切削抵抗は線形に変化するが，刃あたり送り量 0.1 mm/tooth では 3 種類の材料はほぼ等しい．一方，GJS600 と FCD600 が類似した傾向であるのに対し FCD400 は高速側で平均切削抵抗が大きい．



a) GJS600



b) FCD400



c) FCD600

図 2 供試材料の金属組織

切削抵抗について，まず FCD400 を考察する．これは表 3 に示したとおり，他の GJS600 と FCD600 と比べ延性が高く柔らかい鋳鉄であることが，大きな切削抵抗をもたらしていると考えられる．次に，GJS600 と FCD600 を考察する．両者の引張強さは同等であるが，GJS600 の延性は 3 種類のうち最小

表 3 供試材料の機械的性質

	0.2%耐力 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	伸び [%]	マクロ硬さ [HBW]	*マイクロ硬さ[HV0.1]	
					フェライト相	パーライト相
GJS600	501	623	21	212	265	-
FCD400	279	422	27	148	174	-
FCD600	392	655	10	223	211	301

※測定箇所 5 点の平均値

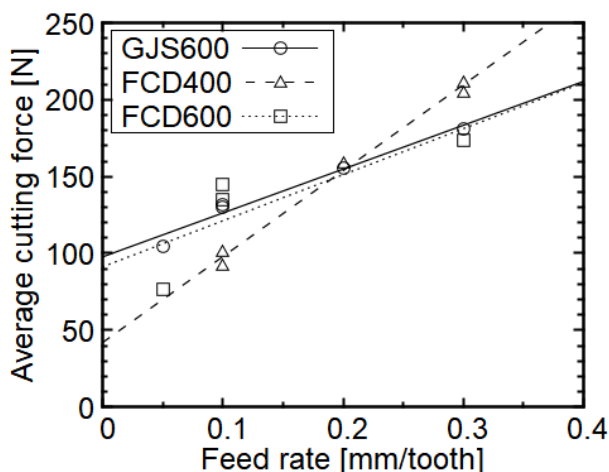


図 3 種々の刃あたり送り量に対する切削抵抗

である FCD600 と最大である FCD400 の中間である。この観点では、GJS600 の切削抵抗は FCD600 より大きいと考えられる。これに対して、マイクロの特性、すなわち基地組織から考えると、GJS600 は FCD400 と同じくフェライト相が大半を占めているが、FCD600 はマイクロ硬さが大きいパーライト相が多く含まれている。この観点では、GJS600 の切削抵抗は FCD600 より小さいといえる。以上より、マクロの観点の一つである高い延性による切削抵抗の増大と、マイクロの基地組織の観点での切削抵抗の低減が相殺し、GJS600 の切削抵抗は FCD600 と同等になったものと考えられる。

図 4 と図 5 に刃あたり送り量 0.1 mm/tooth における切削によるチップ逃げ面の摩耗幅の変化とその摩耗の拡大写真を示す。図 4 より、新品のチップに対しそれぞれ摩耗が進行しているが、図 4 と図 5 により終了時においては FCD600、FCD400、そして GJS600 の順に摩耗幅が大きいことがわかる。なお、3 種類の材料すべてにおいて、一般的なチップの寿命といわれる摩耗幅 0.2 mm には達していない。FCD600 のチップの摩耗が激しいが、これは切削時にチップが基地組織に局在するパーライト相中の炭

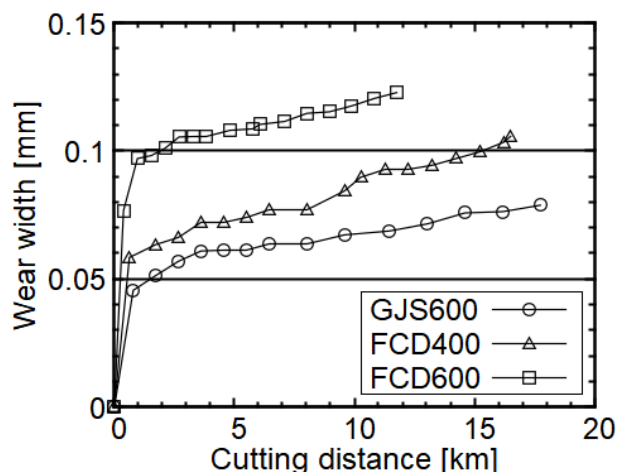


図 4 刃あたり送り量 0.1 mm/tooth における切削距離とチップ逃げ面の摩耗幅の関係

化物に接触することによるアブレシブ摩耗が発生しているものと推測される。FCD400 は、GJS600 に比べると、フェライト相の硬さが低く延性が高いため、切削時に加工硬化しやすいことと、後述する図 7 の粗さ曲線の非周期的な波形から、チップに硬い構成刃先が生成されているものと思われる。

図 6 に表面粗さ計により得られた供試体表面の算術平均粗さ R_a 、また図 7 に例として刃あたり送り量 0.1 mm/tooth における粗さ曲線を示す。FCD400 はすべての刃あたり送り量において他の材料よりも R_a は大きくなり、図 3、図 4 とは傾向が異なる。さらに、FCD400 は正面フライス加工特有の粗さ曲線の周期性も他の材料に比べると判然としなかった。GJS600 は FCD600 に比べ R_a が小さかった。

GJS600、FCD400、および FCD600 における基本特性および切削性の各種項目における数値データを表 4 に整理する。この表には、比較の便宜のため、客観的な数値だけでなく、その数値から切削性の高低を主観的に判定した結果も添えた。すなわち、切削性が、高には○、中には△、低には×を付した。最下行には主観的であるが、総合的な判定結果が示

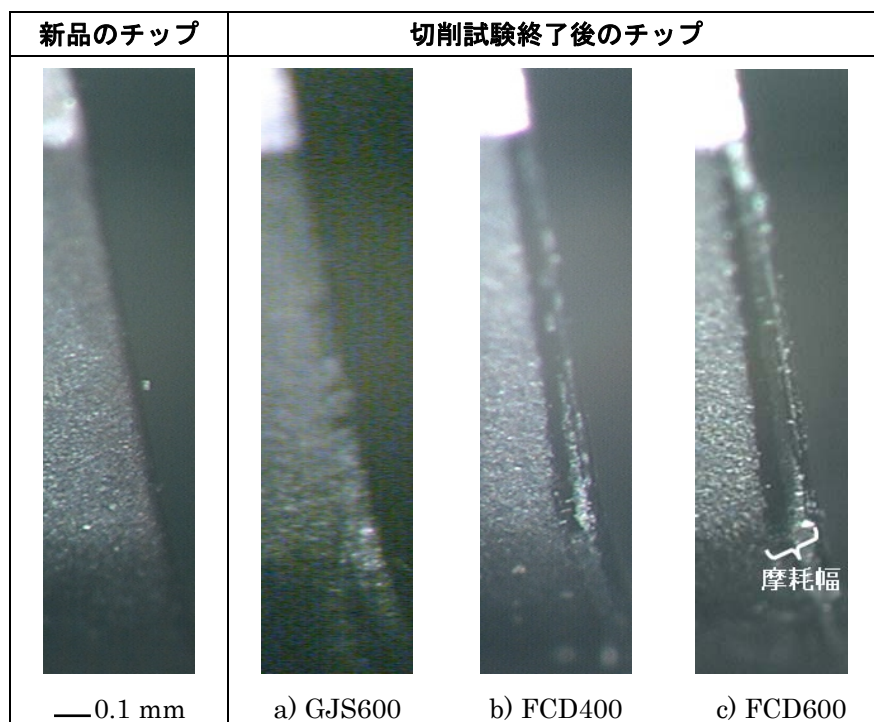


図5 刃あたり送り量 0.1 mm/tooth におけるチップ逃げ面の摩耗

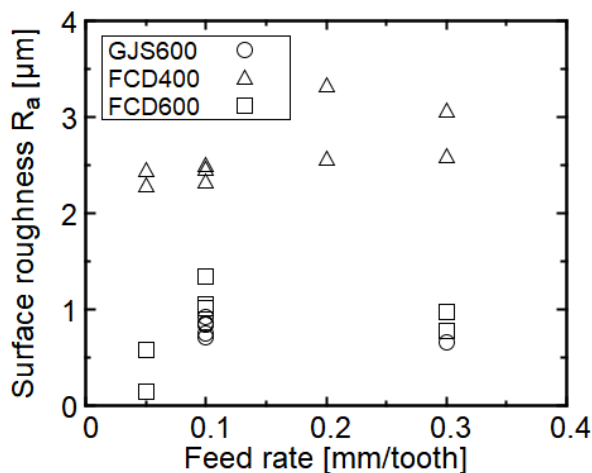


図6 種々の刃あたり送り量に対する加工後の供試体の表面粗さ

されており、GJS600はFCD600に比べ、また特にFCD400に比べ、切削性が良いと判定した。鋳鉄の切削性は他にも切粉、工具付着物、供試体表面の加工変質層など様々な観点で評価されるものである。固溶強化鋳鉄の切削性については加工条件も含めさらなる検証が必要である。

4. 結論

本研究では、固溶強化鋳鉄 GJS600 と、同等の基

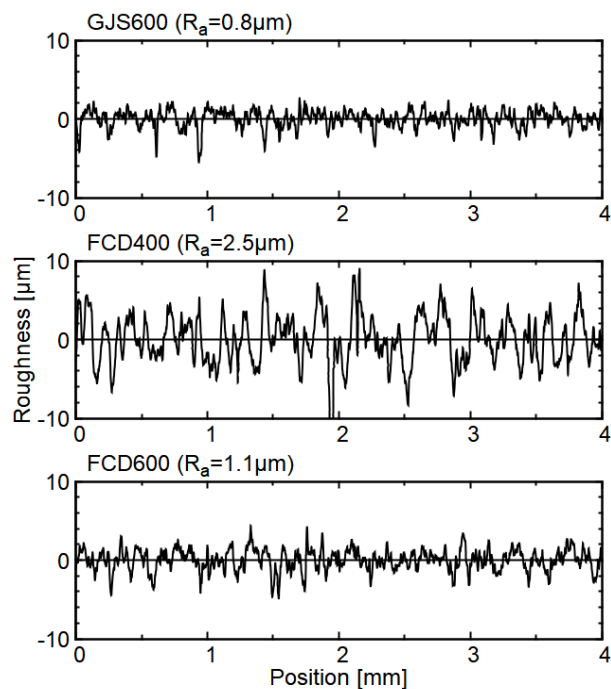


図7 刃あたり送り量 0.1 mm/tooth における供試体表面の粗さ曲線

地組織を有するフェライト鋳鉄 FCD400 および同等の強度を有するパーライト・フェライト鋳鉄 FCD600 の切削性を比較評価した。正面フライス加

表 4 各供試材料に対する基本特性および切削性の評価

大分類	小分類 (評価項目)	GJS600	FCD400	FCD600
機械的性質	引張強さ [N/mm ²]	623 (○)	422 (×)	655 (○)
基地組織	伸び [%]	21 (△)	27 (○)	10 (×)
	パーライト相の影響としての マイクロ硬さ [HV0.1]	- (○)	- (○)	301 (×)
切削性	切削抵抗 (刃あたり送り量に対する 切削抵抗の変化 [N/(mm/tooth)])	2.8×10 ² (○)	5.7×10 ² (×)	3.2×10 ² (○)
	チップ摩耗 (切削距離 0.1 km における摩耗幅 [mm])	0.07 (○)	0.09 (△)	0.12 (×)
	供試体の表面粗さ (刃あたり送り量 0.1 mm/tooth に おける算術平均粗さ R _a [μm])	0.8 (○)	2.5 (×)	1.1 (○)
総合評価		○	×	△

工時における切削抵抗, チップ摩耗および供試体の表面粗さを総合すると, 固溶強化鋳鉄は両者に比べ良い切削性の傾向を示した。

参考文献

- 1) Wolfram Stets et al.: "Solution strengthened ferritic ductile cast iron according DIN EN 1563: 2012- properties, production and application". 2013 Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, p283-292 (2013)
- 2) Richard Larker: "Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators". China Foundry, 6(4), p343-351 (2009)

- 3) 梅谷拓郎ほか: "高 Si フェライト基地球状黒鉛鋳鉄の引張強さ, 疲労強度, 衝撃強さ". 鑄造工学, 86(1), p36-42 (2014)
- 4) 尾上豪浩ほか: "高けい素球状黒鉛鋳鉄の機械的性質・組織に及ぼすマンガン・ニッケルの影響". 三重県工業研究所研究報告, 42, p15-19 (2018)
- 5) 堀江 皓ほか: "新版 鋳鉄の生産技術". (財) 素形材センター, p29-42 (2012)
- 6) Rob Logan et al.: "Soliton strengthened ferritic iron DIS survey". DIS Annual Meeting (2016)
- 7) 上原邦夫: "切削加工研究の展望と鋳鉄の切削概説". 鑄造工学, 70(6), p425-431 (1998)

(本研究は, 法人県民税の超過課税を財源としています。)