

## 固溶強化した球状黒鉛鑄鉄の機械的性質，引け性および切削性評価

近藤義大\*，赤田英里\*

### Mechanical Properties, Shrinkage Characteristics and Machinability of Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron

Yoshihiro KONDO and Eri AKADA

Solution strengthened ferritic ductile cast iron (SSFDI) has a combination of high tensile strength and elongation. For the reason, the ductile iron was established to be a new standard as EN1563:2011. We investigated the effects of Si content on mass effects for mechanical properties, shrinkage characteristics, and machinability of shaping. We found that the tensile strengths achieve 500 MPa and 600 MPa for the SSFDI with Si content of 3.5% and 4.3%, respectively. In addition, as for the variation of cutting resistance in shaping, the SSFDI showed significantly smaller variance than the spheroidal graphite cast iron with no solution strengthening.

Keywords: Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron, Matrices, Mechanical Properties, Shrinkage Characteristics, Cutting Resistance

#### 1. はじめに

Siによりフェライト基地を固溶強化した球状黒鉛鑄鉄(SSFDI)は、従来のフェライト鑄鉄と同等の延性とパーライト・フェライト鑄鉄と同等の強度を両立するばかりでなく、両者よりも高い耐力比が得られる鑄鉄<sup>1)</sup>として注目されており、海外ではISO 1083:2004, EN 1563:2011などにより規格化されている。また、国内でもSSFDIに関する引張強さ、疲労強度、衝撃強さ等に係る研究が盛んに進められている<sup>2)</sup>。

弊所では、本鑄鉄の利用を国内で広げるための基礎的なデータとするために、これまでSi含有量および合金元素の影響<sup>3)</sup>や正面フライス加工における切削性<sup>4)</sup>を調査してきた。本研究では、SSFDIの企業での実用化を見据えて、JIS G 5502:2001におけるフェライト+パーライト鑄鉄 FCD500-7およびパーライト+フェライト鑄鉄 FCD600-3の

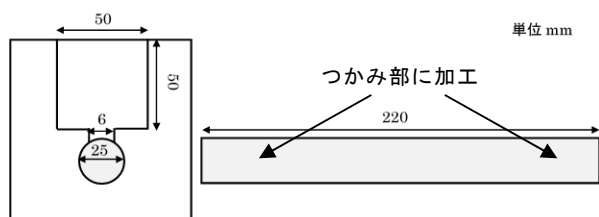
代替材料として必要な引張強度、それぞれ 500 MPa, 600 MPa を達成するための Si 含有量の調査を行った。また、冷却速度の機械的性質への影響、引け試験片による引け性評価、および形削り加工による切削抵抗値の測定を行った結果について報告する。

#### 2. 実験方法

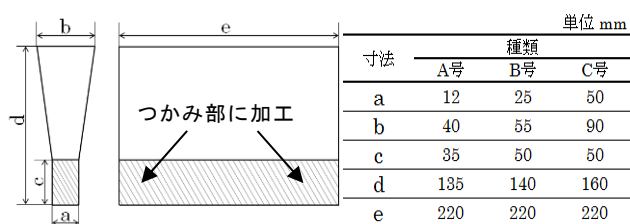
##### 2. 1 溶解実験と供試材料

供試材料は、EN1563:2011における固溶強化鑄鉄 GJS500-14 (以下、GJS500) および GJS600-10 (以下、GJS600) , 並びに比較材料として JIS G 5502:2001におけるフェライト鑄鉄 FCD450-10 (以下、FCD450) およびパーライト+フェライト鑄鉄 FCD600-3 (以下、FCD600) とした。原材料は高純度銑鉄、鋼板および鉄くず、添加材は FCD600 以外については金属シリコンおよび Fe-75%Si, FCD600 のみはそれらに加えて Cu を用いた。Si 含有量が諸性質に及ぼす影響を調査する

\* 金属研究室

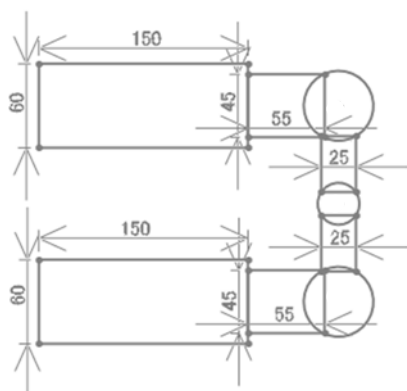


a) ノックオフ形供試材の形状及び寸法

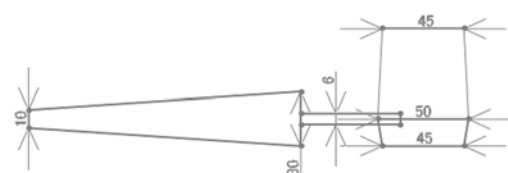


b) Y型供試材の形状及び寸法

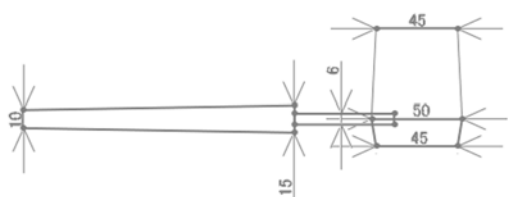
図1 強度供試材図面



a) 平面図 (上から, 肉厚 30 mm と 15 mm の試験片)



b) 側面図 (横から, 肉厚 30 mm 試験片)



c) 側面図 (横から, 肉厚 15 mm 試験片)

図2 引け試験片図面 (単位はすべて mm)

ため, 目標化学成分は Si 含有量が 3.5% から 5.0% となるよう調整し, C 含有量は炭素当量 (CE.  $CE = C\% + 1/3Si\%$ ) がほぼ共晶組成となるよう, Si 含有量に応じて変化させた. 溶湯は容量 50 kg の高周波誘導炉にて目的化学成分に溶製し, 約 1520 °Cにて取鍋に出湯し, ただちに球状化处理および接種処理を行うことで調整した. 調整後の溶湯を, 図 1a)に示すノックオフ形供試材 (Kb 形), 図 1b)に示す Y 型供試材 (A 号, B 号, C 号. この順に試験片切り出し部が大きくなっている), 図 2a)-c)に示す引け試験片, 図 3 に示す形削り試験片に注湯した. 鑄型はノックオフ形供試材のみシエル鑄型 (人工砂), その他はフェノールウレタン樹脂 (天然砂) を用いて造型した.

## 2. 2 供試材料の評価

供試材料の機械的性質および金属組織観察のため, ノックオフ形供試材, Y 形供試材を JIS Z 2241:2011 における 4 号試験片に旋盤にて加工した後, 引張試験することで引張強度, 0.2%耐力および伸びを測定した. なお, Y 形供試材 A 号からは平行部が  $\phi 8$  mm となるよう, 4 号試験片平行部 ( $\phi 14$  mm) を 4/7 倍した引張試験片を切り出し, 引張試験を行った. さらに, ノックオフ形供試材, Y 形供試材の各試験片のつかみ部から硬さ試験片および検鏡試料を作製し, 硬さ測定 (ノックオフ形供試材は HBW10/3000, Y 形供試材は HRB) と金属組織観察をした.

## 2. 3 引け性評価

鑄鉄の引けは, 厚肉部の表面にへこみ状に発生する外引けと, 薄肉部の内部に発生する空隙 (ザク巣) である内引けの二種類に分類される. 本研究ではその両方を測定することを目的として, GJS500 および GJS600 の溶湯で肉厚 30 mm と 15 mm の板状の引け試験片を鑄造した. 肉厚 30 mm 試験片では表面に発生した外引けを横断するように, 5 mm 間隔で相対的な深さ (試験片両端部に対する引けの最深値) をリニアゲージを用いて測定した. 肉厚 15 mm 試験片では上方から X 線透過試験 (管電圧 200 kVp, 管電流 5 mA, 照射時間 30 秒間) を行い, 内引けによると考えられるフィルム感光部の形状をトレースし, 画像処理ソフトを用いてその面積を測定し, この面積を「内引け発生面積」とした.

## 2. 4 形削り試験

図4に形削り試験の概要を示す。切削試験の供試材は図3に示した直径45mmの丸棒を長さ40mmに切断し、中心部に固定用の貫通穴を空けたものとした。

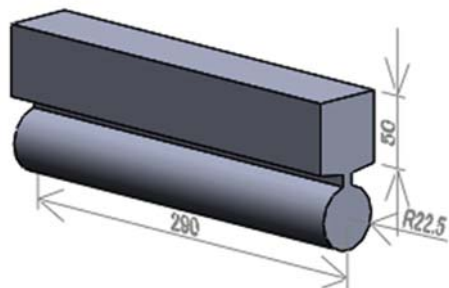


図3 形削り試験片 (単位はすべて mm)



図4 形削り試験の概要



図5 丸チップ装着用治具

表1 加工条件

加工方法	マシニングセンタの主軸Z軸方向の運動による形削り
供試材	GJS500, FCD450
丸チップ	SANDVIK RCMT1606 Mo H13A
切り込み深さ	0.5 mm
送り速度	1,000, 2,000, 4,000 mm/min
切削油	なし

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1に示す加工条件で、図5に示す治具に新品の丸チップを装着し、供試材を黒皮ごと形削り加工を行うことで、切削抵抗を測定した。切削抵抗は、供試材の下に固定した切削動力計にて測定し、加工によって供試材が受けるZ軸方向（ステージに対して鉛直方向）の負荷を測定した。なお、表面粗さによる切り込み深さの誤差を抑えるため、加工面には洗われ等による凹凸がなく、鑄肌が良好な面を選択した。また、加工性評価試験片を切断、熱硬化性樹脂に包埋、研磨し、金属組織観察とマイクロ硬さ測定を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 Si含有量が機械的性質に及ぼす影響

Si含有量がノックオフ形供試材による引張強度および0.2%耐力、伸び並びにブリネル硬さへ及ぼす影響を図6a)-c)に示す。なお、黒鉛形状不良による強度と伸びの低下の影響を除外するため、黒鉛球状化率が80%以上の試料の結果のみをプロットした。

引張強度および0.2%耐力は、Si含有量が増加するにしたがって上昇し、Si含有量3.5%程度で引張強度500MPaを、Si含有量4.3%程度で引張強度600MPaを達成した。ブリネル硬さも同様にSi含有量が増加するにしたがって上昇した。

伸びは、相関は低いが、今回実験したSi含有量3.5%から5.0%の範囲では、Si含有量が増えるに従い低下する傾向があった。特にSi含有量が4.3%以上では極端に伸びが低くなり、GJS600の規格値である10%を下回る試験体が複数現れた。

StetsらはSi含有量が4.3%を超えると引張強度が減少すると報告しているが、今回の研究では、あるSi含有量を境に引張強度が低下する傾向はみられなかった。しかし、Si含有量が4.3%を超えると伸びが10%を下回るケースが複数見られたため、Siのフェライトへの固溶強化が進み基地組織が脆化したことが示唆される。10%以上の十分な延性を確保しつつ、Si固溶強化により引張強度500MPa、600MPaを達成するためには、それぞれSi含有量を3.5%、4.3%に設定するとよいと考えられる。

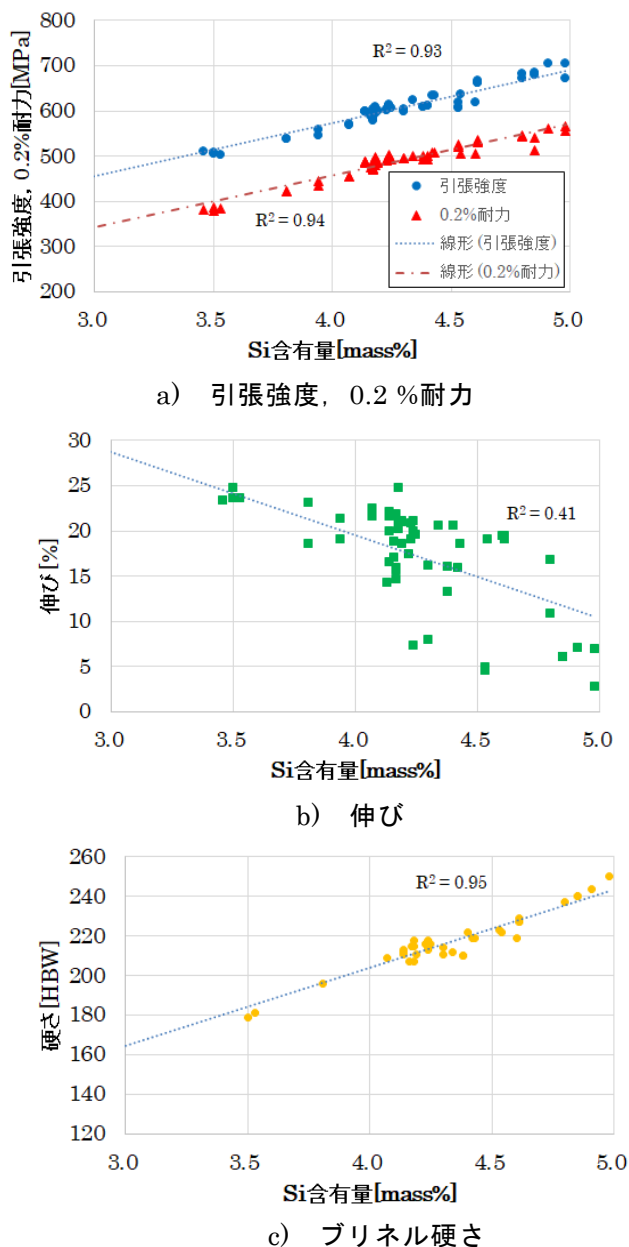


図6 Si含有量が諸性質に及ぼす影響

### 3.2 肉厚感受性評価

表2にY形供試材(A号, B号, C号)の機械的性質および金属組織観察結果を, 表3に化学成分値を示す. A号, B号, C号いずれにおいても, GJS500はSi含有量3.5%で引張強度500MPaを, GJS600はSi含有量4.6%で引張強度600MPaを達成した. また, GJS500, GJS600の耐力比(耐力/引張強度)はそれぞれ75%, 81%であり, 比較対象であるFCD450の68%よりも高耐力比であることが確認された.

n=1であるため有意差の有無を統計的に検定することはできないが, 以下の仮説が考えられる. すなわち, GJS600の硬さは, Y形供試材の肉厚の違いによらずほぼ一定であり, 基地組織はいずれも全面Si固溶強化フェライトであったが, 比較のため実験した通常のFCD450は, Y形供試材A号がB号及びC号よりもわずかに硬く, パーライト面積率もA号が最も高くなった. これは, 通常のFCD450は, 最も薄肉であり冷却速度が速いA号はパーライトが析出して硬くなったのに対し, GJS600のA号は, 冷却速度が速いにもかかわらずパーライトが析出しなかったため肉厚の違いによる硬さの違いが表れなかったものと考えられる. これらのことから, Si含有量を4.5%程度まで増やした固溶強化鋳鉄は, 肉厚感受性が低いという仮説が考えられる.

なお, GJS600のC号試験片の金属組織において, 局所的に図7に示すチャンキー黒鉛が晶出していることが確認された. GJS600のSi含有量は実測値で4.6%あり(表3), 黒鉛化促進元素であるSiは厚肉部においてチャンキー黒鉛の晶出を

表2 Y形供試材の機械的性質および金属組織観察結果

Y形供試材	0.2%耐力 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	耐力比 %	伸び [%]	硬さ [HRB]	球状化率 [%]	黒鉛粒数 [個/mm <sup>2</sup> ]	パーライト面積率 [%]
GJS500	A号	390	518	75	20	89	200	オールフェライト
	B号	385	504	76	24	87	137	オールフェライト
	C号	391	516	76	19	87	72	3
GJS600	A号	517	642	81	16	96	258	オールフェライト
	B号	505	620	81	19	96	156	オールフェライト
	C号	503	615	82	12	95	124	オールフェライト
FCD450	A号	—	457	—	24	84	213	12
	B号	303	448	68	25	81	164	5
	C号	307	453	68	24	80	99	9

表 3 Y 形供試材の化学成分 [mass%]

	C	Si	Mn	P	S	Mg
<b>GJS500</b>	3.05	3.53	0.25	0.02	<0.01	0.045
<b>GJS600</b>	2.75	4.60	0.25	0.02	<0.01	0.039
<b>FCD450</b>	3.67	2.61	0.40	0.02	0.01	0.041

助長する<sup>5)</sup>ことが知られていることから、固溶強化鉄で 50 mm 角程度の厚肉鋳物を鋳造する際は、Ce 等のレアアース元素の添加を少なくする、Sb を微量添加する<sup>6)</sup>等のチャンキー黒鉛対策を講じる必要があると思われる。

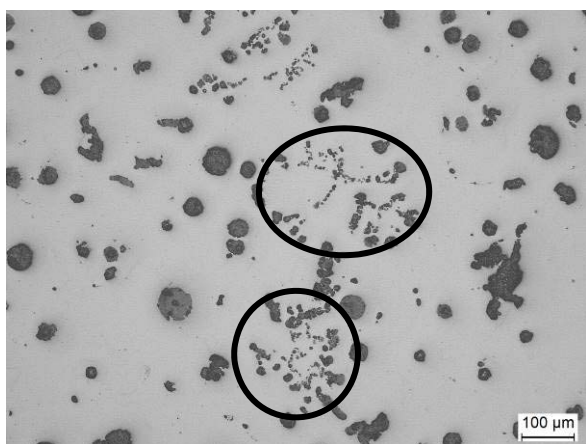


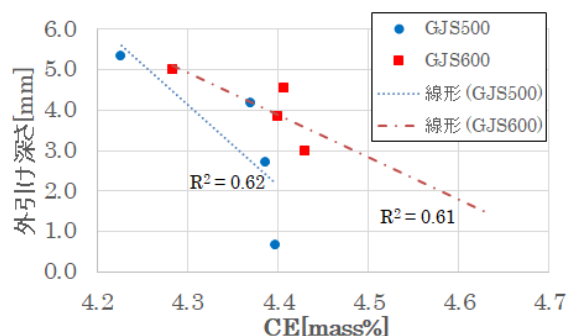
図 7 GJS600 C 号試験片に晶出したチャンキー黒鉛（丸で囲った部分）

### 3. 3 引け性評価

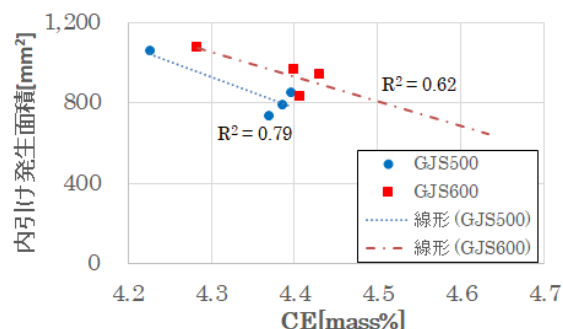
肉厚 30 mm 試験片の外引けの深さを図 8a)に示す。GJS500, GJS600 とともに線形近似直線の傾きが負になり、炭素当量 CE を 4.3 未満から過共晶である 4.4 へ上げることで外引け深さが浅くなる傾向がみられた。

肉厚 15 mm 試験片の内引け発生面積を図 8b)に示す。外引け深さと同様に、線形近似直線の傾きが負になり、GJS500, GJS600 とともに炭素当量 CE を 4.4 へ上げると内引け発生面積がやや軽減された。

これらをまとめると、GJS500, GJS600 とともに炭素当量が共晶点である 4.28 %よりもやや過共晶側のほうが外引け、内引けともに軽減される傾向が認められた。今後は測定点数を増やし、GJS500, GJS600 で引けが少なくなる化学成分値（特に炭素当量）を解明したい。



a) 30 mm 試験片の外引け深さ



b) 15 mm 試験片の内引け発生面積  
図 8 引け性評価

### 3. 4 切削性評価

形削り試験片の別鋳込みノックオフ形供試材の機械的性質と金属組織、化学成分をそれぞれ表 4, 表 5 に示す。GJS500 の基地組織は全面固溶強化フェライトとなり、FCD450 は Si 含有量が 2.4 % であるため基地組織はフェライト+パーライトとなっていることが確認された。

表 4 に示すように、FCD 材の伸びが、JIS G 5502:2001 におけるフェライト鋳鉄 FCD450-10 の基準である 10%に満たなかった。これは、強度試験片平行部に局所的に著しく球状化不良が発生している部位が確認され、この部位から破壊が進行したことによると考えられる。供試体とした FCD 材の金属組織は、黒鉛球状化率が 91%あり、局所的な球状化不良がなければ良好な強度および伸びを達成したと考えられることから、FCD450 として表記することにした。



表 4 形削り試験片別鑄込みノックオフ形供試材の機械的性質と金属組織観察結果

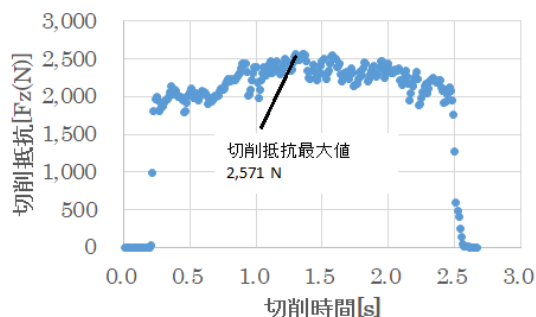
	機械的性質			金属組織観察結果			
	0.2%耐力 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	伸び [%]	マクロ硬さ [HBW]	黒鉛球状化率 [%]	黒鉛粒数 [個/mm <sup>2</sup> ]	パーライト面積率 [%]
GJS500	425	540	23	189	87	205	オールフェライト
FCD450	302	458	8*	169	91	190	20

\*伸びが JIS G 5502 における FCD450 の規格値である 10%に達しなかった。

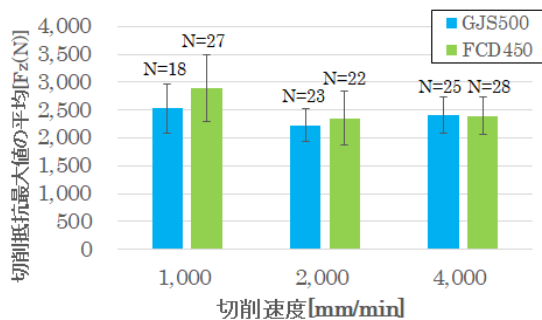
表 5 形削り試験片別鑄込みノックオフ形供試材の化学成分 [mass%]

	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
GJS500	3.22	3.79	0.27	0.03	<0.01	0.057	0.02
FCD450	3.39	2.39	0.26	0.03	<0.01	0.050	0.26

形削り試験による切削抵抗を測定した代表的な 1 試料のグラフを図 9a)に示す。切削加工中に切削動力計が計測した最大の抵抗値を切削抵抗最大値と定義した。GJS500, FCD450 それぞれについて、図 9b)に形削り試験による切削速度ごとの切削抵抗最大値の平均値（エラーバーは標準偏差）を示す。切削速度は 1,000, 2,000, 4,000 mm/min とした。また、図 10a)-c)に形削り試験片の黒皮直下の金属組織写真を、表 6 に形削り試験片の基地部分のマイクロ硬さを示す。



a) 切削抵抗 (切削速度 1,000mm/min)



b) 切削抵抗最大値の平均  
(エラーバーは標準偏差)

図 9 形削り加工による切削抵抗

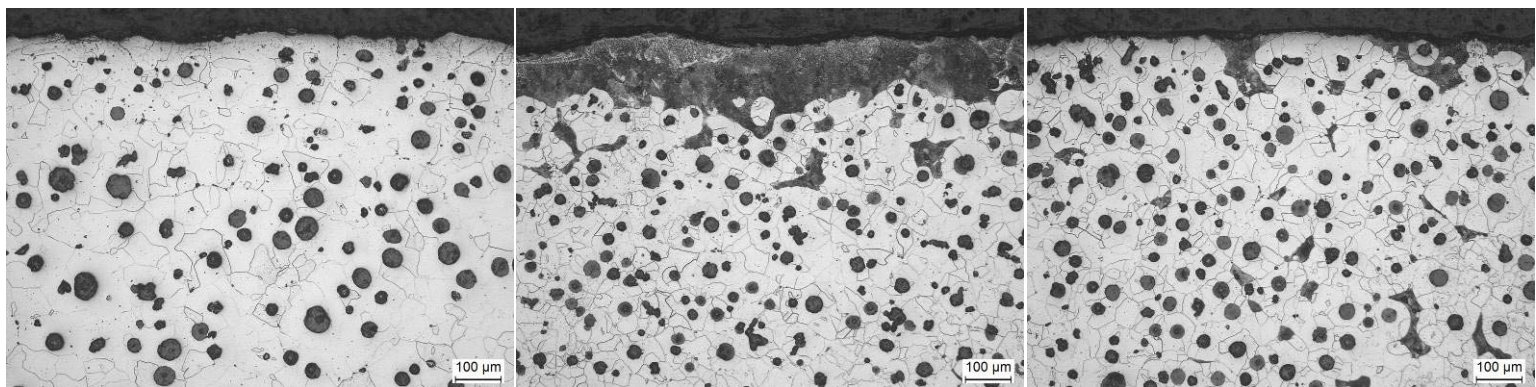
表 6 形削り試験片のマイクロ硬さ

	*マイクロ硬さ[HV0.3]	
	フェライト相	パーライト相
GJS500	204	—
FCD450	164	309

\*測定箇所5点の平均値

図 9b)に示すように、GJS500, FCD450 のいずれの切削速度においても切削抵抗最大値の平均に差はないように見える。切削抵抗最大値のばらつきに有意差があるかを検証するため、GJS500 と FCD450 の各切削速度における切削抵抗最大値について F 検定を適用した。その結果、GJS500 の FCD450 に対する分散比は、切削速度 2,000 mm/min では  $F(22-1,23-1) = 2.55$ ,  $p = 0.02$  と有意に大きく、切削速度 1,000 mm/min では  $F(27-1,18-1) = 1.83$ ,  $p = 0.08$ , 切削速度 4000 mm/min では  $F(28-1,25-1) = 1.01$ ,  $p = 0.49$  と有意に大きくはなく、切削速度 2,000 mm/min の条件において GJS500 は FCD450 よりも切削抵抗の最大値のばらつきが減少していることが確認された。

この現象の原因は、GJS500, FCD450 それぞれの黒皮直下の金属組織から推察される。すなわち、GJS500 は図 10a)に示すように、一様に球状黒鉛が存在し、基地組織は固溶強化フェライトで HV0.3 は平均 204 であった (表 6)。これに対して、FCD450 は図 10b)のように黒皮直下に厚さ 140 μm 程度のパーライトからなる無黒鉛層と、図 10c)のようにパーライトが少なくかつ球状黒鉛が存在する部分が混在していた。なお、HV0.3 の平均はパーライトは 309, フェライトは 164 と大きな開きがある。



a) GJS500

b) FCD450 (パーライトの層が厚い部分)

c) FCD450 (パーライトが少ない部分)

図 10 形削り試験片の黒皮直下の組織写真

	切削速度[mm/min]		
	1,000	2,000	4,000
GJS500			
凸部の数	9 個	12 個	12 個
FCD450			
凸部の数	7 個	10 個	16 個

図 11 形削り試験片加工跡の拡大写真

これらのことから、GJS500 は黒皮直下から工具との潤滑作用を示す黒鉛<sup>7)</sup>が存在し、かつ基地組織は全面固溶強化フェライトであるため、切削抵抗の最大値のばらつきが比較的小さかったが、FCD450 は黒皮直下において黒鉛が存在せず、かつ硬く切削抵抗の大きいパーライト<sup>8)</sup>が厚い部分と、パーライトが少ないため軟らかくかつ黒鉛が存在する部分が混在していたため、切削抵抗の最大値のばらつきが大きかったものと考えられる。

また、切削速度との対応では、FCD450 は、切削速度が大きくなるほど、切削抵抗最大値のばらつきが小さくなる傾向が見られる。GJS500 では、1,000 mm/min に比して、2,000、4,000 mm/min

は同程度に、切削抵抗最大値のばらつきが小さくなる傾向が見られる。この現象を考察するために、図 11 に加工面の拡大写真を示す。FCD450 では切削速度の増大に伴い加工面の粗さが減少し、凸部の間隔が狭くなっており、GJS500 においても 1,000 mm/min と 2,000、4,000 mm/min を比較すると同様な現象が見られた。このような加工面の表面形状の違いが、切削抵抗最大値のばらつきに対応していると推測される。すなわち、切削は、個々の微細な領域を一気にせん断破壊することが逐次的、並行的に行われる形で進み、切削抵抗最大値はその微細領域の面積にせん断降伏応力を乗じた積に相当するものと考えられる。さらにこの

微細領域の面積は加工面の粗さにより大小するものであることから、加工面の粗さの減少が切削抵抗最大値のばらつきの減少の原因であると考えられる。このことについては、今後、定量的に解明したい。

#### 4. 結論

本研究では、固溶強化鋳鉄の強度特性、引け性、形削り加工における加工性を評価し、以下の知見を得た。

・固溶強化鋳鉄で引張強度 500 MPa, 600 MPa を達成するためには、それぞれの Si 含有量は 3.5 %, 4.3 %程度が目安となる。

・固溶強化鋳鉄は、炭素当量を過共晶である 4.4 %程度に調整することで外引け、内引けともに軽減される傾向があった。

・切削速度 2,000 mm/min の形削り加工において、GJS500 の切削抵抗最大値のばらつきは FCD450 よりも小さく、切削抵抗が安定していることが確認された。

#### 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) 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”. 鋳造工学, 86(1), p36-42 (2014)
- 3) 尾上豪浩ほか：“高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)
- 4) 服部俊ほか：“固溶強化した球状黒鉛鋳鉄の切削性評価”. 三重県工業研究所研究報告, 43, p27-32 (2019)
- 5) 中江秀雄：“チャンキー黒鉛の生成機構とその防止法”. 鋳造工学, 76(2), p107-113 (2004)
- 6) 社団法人日本鋳造工学会：“鋳造欠陥とその対策”. P161 (2007)
- 7) 上原邦夫：“切削加工研究の展望と鋳鉄の切削概説”. 鋳造工学, 70(6), p425-431 (1998)
- 8) Israel Martinez ほか：“組織および機械的特性の異なる球状黒鉛鋳鉄の被削性”. 砥粒加工学会誌, 61(3), p139-144 (2017)

(本研究は、法人県民税の超過課税を財源としています.)