

# 鑄鉄の半溶融鍛造・1

Mashy-state Forging of Cast-iron・1

木内 学\*・杉山 澄雄\*  
Manabu KIUCHI and Sumio SUGIYAMA

## 1. はじめに

筆者らは、鑄鉄・各種合金あるいは金属—セラミック系複合材料 (FRM, PRM) などの難加工材の成形およびその内部組織の改良に大きな効果が期待される半溶融加工技術の応用について研究を進めている。

既報<sup>1)</sup>においては、半溶融圧延法による各種鑄鉄の薄板製造技術について検討するとともに、製品の内部構造の改質、たとえば、表層部から中心部に向かって片状黒鉛鑄鉄から球状黒鉛鑄鉄に段階的に変化する、いわゆる傾斜機能性を有する新鑄鉄素材の製造が可能であることを示した。

本報では、各種鑄鉄の半溶融鍛造を試み、その際の加工条件と製品性状 (外面性状, 内部組織, 硬さ) について調査し、従来一部の鑄鉄を除いてほとんど不可能と考えられた鑄鉄の型鍛造加工について検討した結果を報告する。

## 2. 実験方法および条件

被加工材 (ピレット) は、片状黒鉛鑄鉄 (FC-20とFC-30)、共晶黒鉛鑄鉄および球状黒鉛鑄鉄 (FCD-45) などの代表的な鑄鉄であり、市販の鑄鉄素材を用い、これを所定の寸法に切断し供試材とした。鑄鉄の材質、冷却曲線から求めた固相線 (共晶) 温度、ならびにピレットの寸法を表1にまとめて示す。

試験条件としては、主として鍛造温度に注目し、熱間域から半溶融域までの種々の温度で実験を行った。実験は角柱ピレットを円板状にすえ込む密閉型鍛造を対象とし、ピレットの寸法は20×30×30mm、金型の内径 (製品の円板外径) はφ40mm、金型温度は室温を標準とした。

実験方法の概要を図1に示す。ピレットの加熱は、大気中で、高周波誘導加熱炉 (炉内寸法φ50×80mm) により行った。温度は、K熱電対を用い、ピレット中心 (重心) 位置での温度を測定し、その温度を代表とした。ピ

\*東京大学生産技術研究所 第2部

表1 実験条件一覧表

	C	Si	Mn	P	S	固相線温度 (共晶)
片状黒鉛鑄鉄						
FC-20	3.60	2.91	0.30	0.125	0.023	約1145°C
FC-30	3.06	3.51	0.50	0.169	0.013	約1150°C
共晶黒鉛鑄鉄	3.35	2.85	0.20	0.25	0.08	約1138°C
	3.70	3.35	0.60	≥	≥	
球状黒鉛鑄鉄						
FCD-45	3.63	3.04	0.15	0.035	0.007	約1115°C
20t×30w×30L mm						

鍛造温度 T/°C	1000~1200
鍛造圧力 P/MPa	760
保持時間 /s	30
金型温度	室温
プレス	油圧プレス 最大100ton 速度約8mm/s

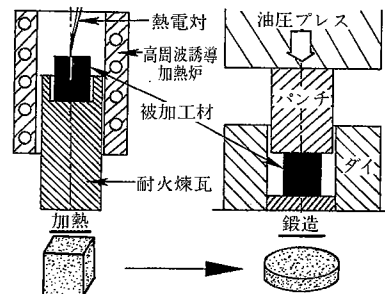


図1 鑄鉄の半溶融鍛造実験の概要

レット各部の温度分布の測定例を図2に示す。図から、鍛造温度1150°C前後においては、ピレット中心部近傍での温度分布は±10°C以内であるが、表層部は中心部より約350°C低い温度となっており、この場合、ピレットは均一な半溶融状態ではなく、表層部は熱間域にあり、中心

研究速報

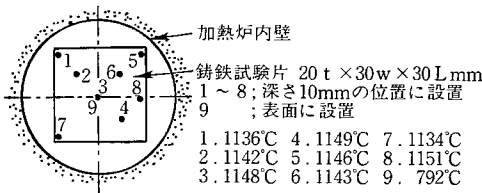


図2 被加工材各部の温度分布

部が半溶融状態となっていることがわかる。加熱炉からピレットを取り出し鍛造開始までの時間は30秒以内であるが、その間のピレット中心部での温度降下は10°C未満である。鍛造圧力は760MPa一定とし、成形後約30秒間加圧保持した。

3. 実験結果および考察

3.1 外面性状の検討

図3は、FC-30とFCD-45について、製品の外面性状におよぼす鍛造温度の影響を示す。いずれの鑄鉄についても、熱間鍛造においては、鍛造圧力が760MPaとかなり高いにもかかわらず未充満部が残り、また、外表面に割れが発生した製品となっている。これに対し、半溶融鍛造では、液相成分の存在によりピレットの変形・流動が促進され、また液相成分が外周部に流出することなどを通して被加工材が型に充満し、所定の形状・寸法を有する製品となっている。ただし、型に充満した一部の製品に関して、液相成分が凝固した部分の数カ所に微小割れが発生しているが、この問題に関しては、パンチ・ダイなどの型とピレットとの相対温度差に起因していると思われることから、パンチ・ダイをあらかじめ加熱し使用することで解決できると考えられる。

図4は、FC-20、共晶黒鉛鑄鉄の半溶融鍛造後の製品形状を示す。FC-30、FCD-45と同様に、半溶融鍛造によって型に充満した所定の製品が得られている。

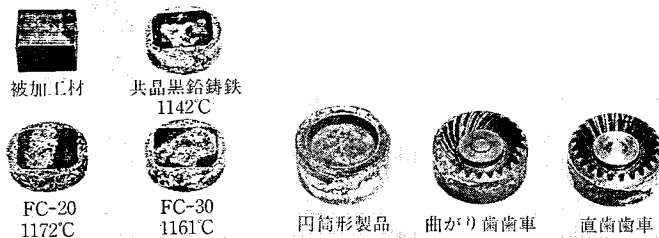


図4 半溶融鍛造による各種鑄鉄の製品例 図5 半溶融鍛造による複雑形状の製品例 (角柱ピレットから円板状に成形)

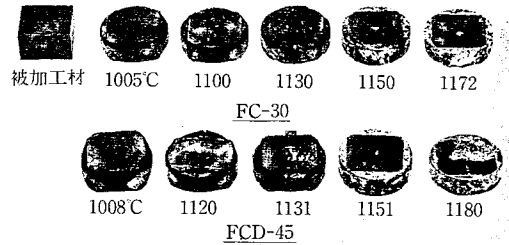


図3 製品の外面性状におよぼす鍛造温度の影響

図5は、半溶融鍛造の実用部品への応用として、上部のみが円筒容器状の製品、ならびに歯形部を有する製品の鍛造を試みた例を示す。ただしこの場合、加工前のピレットの寸法はφ40×15mmである。液相成分の存在による被加工材の流動性の向上を利用することにより、図に示すような複雑な形状の製品を一回の鍛造工程で製造することが可能である。

図6は、すえ込み加工の各段階における被加工材の外面性状などの観察をもとに、ピレットの変形挙動を考察した結果を示す。すなわち、(1)加工前、表層部温度は中心部温度より300°C前後低く固相状態であり、中心部は固相成分と液相成分が混合した半溶融状態である、(2)加工の進行に伴い、バルジ変形が起こり、同時に、液相成分が内部から流出し、型内の空隙部に充満する、(3)充満後、被加工材は、パンチおよび型から圧力を受けつつ急速に冷却される。したがって、製品内部は、図に示すように、概略、液相成分が流動・集積し凝固した部分、固相成分が変形した部分の三領域に分類でき

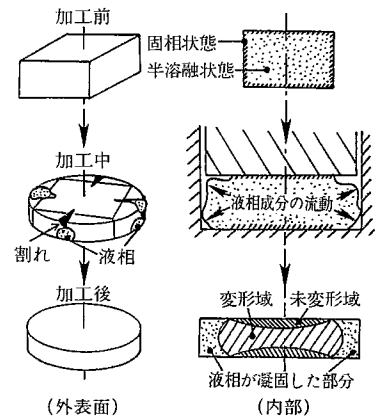


図6 被加工材の変形状態

研究速報  
る。

3.2 内部組織の検討

加工前の鑄鉄素材の内部組織ならびに半溶融状態の内部組織については、既報<sup>3)</sup>に詳述してあるので参照されたい。

図7は、FC-30の(1)熱間鍛造後、(2)半溶融鍛造後、(3)半溶融鍛造→高温焼きなまし後、の製品の内部組織を示す。(a)は製品縦断面の中心部、(b)は周辺部を示す。(1)から、熱間鍛造品の中心部の結晶組織は塑性変形し、樹枝状の初晶オーステナイト部が扁平化している。周辺部は、樹枝状組織が素材のままの形で残留し、大きな変形をしていない。(2)から、半溶融鍛造品の中心部は初晶オーステナイト部が針状の組織となって密集しており、全体としてまだら鑄鉄(セメントライト、パーライト、黒鉛の混合組織)組織である。周辺部は液相成分が急冷凝固してできた白鑄鉄(セメントライトとパーライトの混合組織)組織である。(3)から、半溶融鍛造後焼きなました製品の中心部は、黒鉛が片状あるいは塊状に析出し、ねずみ鑄鉄(パーライトと黒鉛の混合組織)あるいはフェライト鑄鉄(フェライトと黒鉛の混合組織)に変化している。周辺部は、数 $\mu\text{m}$ の球状黒鉛が析出し、球状黒鉛鑄鉄になっている。

図8は、FC-20、共晶黒鉛鑄鉄の半溶融鍛造→高温焼きなまし後の製品の内部組織を示す。FC-30と同様に、中心部と周辺部とは内部組織が大きく異なり、中心部はね

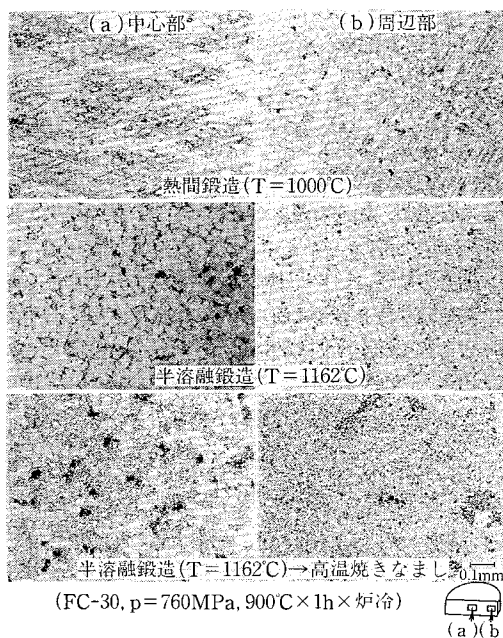


図7 片状黒鉛鑄鉄 (FC-30)の鍛造後の内部組織

ずみ鑄鉄あるいはフェライト鑄鉄であり、周辺部は球状黒鉛鑄鉄となっている。

図9は、FCD-45の製品の内部組織を示す。熱間鍛造あるいは固相線(共晶)温度近傍の半溶融鍛造では、中心部と周辺部とで、黒鉛の大きさ・形状・分散に、表2に示すような変化が認められる。固相線(共晶)温度より50~60°C高い半溶融鍛造では、FC-30と同じように、中心部はまだら鑄鉄、周辺部は白鑄鉄となっている。この半溶融鍛造製品を高温焼きなましすることによって、中心部には、素材時に存在していた数十 $\mu\text{m}$ の球状黒鉛と新しく析出した数 $\mu\text{m}$ の球状黒鉛とが混在した組織となり、周辺部は数 $\mu\text{m}$ の球状黒鉛が析出し均一に分布した組織となることわかる。

図10は、半溶融鍛造により製造された歯形部を有する製品の縦断面の内部組織を示す。ダイおよびパンチの形状を図中に示す。すなわち、ダイは円筒形(割型)であり、パンチには段差を付け、その段差部で歯形が形成される。ピレットの寸法は $\phi 40 \times 15\text{mm}$ である。図から、歯形の底部は固相成分が塑性変形し、結晶組織が扁平化し、黒鉛の形状も片状である。側壁部は未変形域となっていて、大きな組織変化は見られない。歯先部は液相成分によって形成されているため、高温焼きなまし後、数 $\mu\text{m}$ の

表2 球状黒鉛鑄鉄製品の中心部と周辺部の黒鉛の状態

	中心部	周辺部
黒鉛の大きさ	小	大
形状	扁平	球形
分布	密	粗

\* FCD-45の熱間鍛造または固相線温度近傍の半溶融鍛造

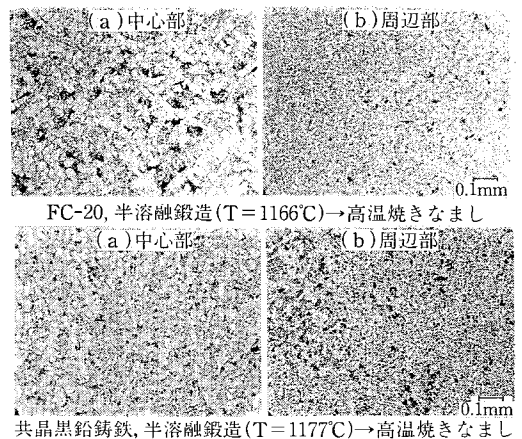


図8 FC-20、共晶黒鉛鑄鉄の半溶融鍛造後の内部組織

研究速報

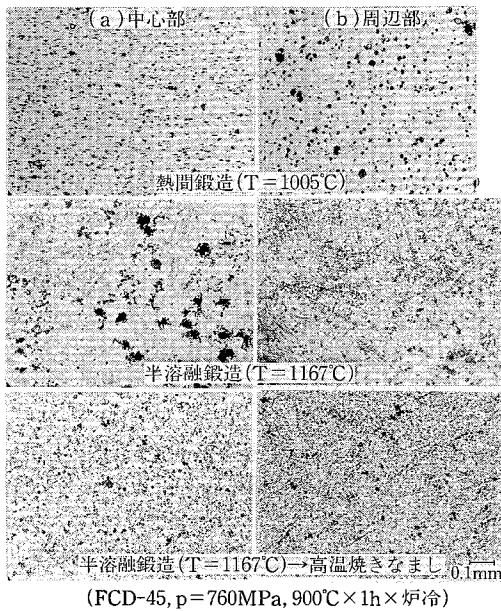


図9 球状黒鉛鑄鉄 (FCD-45) の鍛造後の内部組織

球状化黒鉛が析出している。

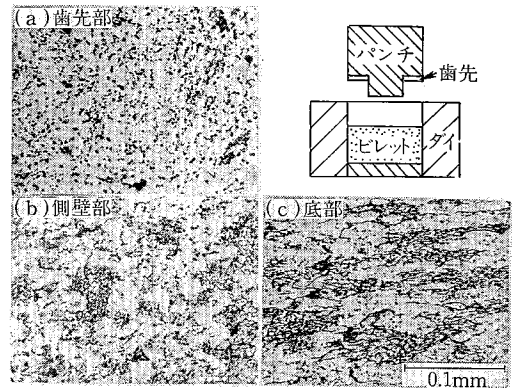
3.3 製品の機械的特性

図11は、各種鑄鉄製品の中心部と周辺部の硬さ(ロックウェルBスケール)分布を示す。a, b, c, dは、市販の各鑄鉄の硬さを参考のために記す。a-1~a-4ならびにd-1~d-4は、FC-30, FCD-45の熱間鍛造後または半溶融鍛造後の硬さ分布、ならびに高温焼きなまし後の製品の硬さ分布を示す。b-1, c-1はそれぞれFC-20, 共晶黒鉛鑄鉄の高温焼きなまし後の硬さ分布を示す。図から、熱間鍛造製品では、中心部と周辺部の硬さの相違はほとんどないこと、半溶融鍛造したどの鑄鉄製品でも、周辺部の硬さは中心部に比べ数パーセント高くなっていること、また、熱間鍛造後または半溶融鍛造後の各鑄鉄製品の硬さは、高温焼きなまし後に比べ、30~40%高いことがわかる。

表3 実験結果のまとめ

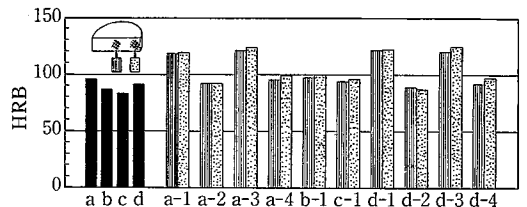
	形状	内部組織	機械的特性(硬さ)
熱間鍛造	・未充填 ・表面に割れ有	・中心部 塑性変形 ・周辺部 未変形	・中心部も周辺部もほぼ同じ
半溶融鍛造	・充填 ・液相成分の凝固部に微少割れ有 ・複雑形状部品製造可	・中心部 固相成分 ・周辺部 液相成分(高温焼きなまし後数 $\mu\text{m}$ の球状黒鉛が析出)	・周辺部は中心部に比べ数%高い ・高温焼きなまし材はF材に比べ30~40%高い

\*角柱ピレットを円板状にすえ込む密閉型鍛造を対象とする



共晶黒鉛鑄鉄, 半溶融鍛造→高温焼きなまし (T=1181°C, p=760MPa, 900°C×1h×炉冷)

図10 半溶融鍛造により製造された歯形製品の内部組織



- a: FC-30市販材
- b: FC-20市販材
- c: 共晶黒鉛鑄鉄市販材
- d: FCD-45市販材
- a-1: FC-30 熱間鍛造(T=1000°C, p=760MPa)
- c-1: 共晶黒鉛鑄鉄半溶融鍛造→高温焼きなまし(T=1000°C, p=760MPa, 900×1h×炉冷)
- a-2: FC-30 熱間鍛造→高温焼きなまし(T=1000°C, p=760MPa, 900×1h×炉冷)
- d-1: FCD-45 熱間鍛造(T=1005°C, p=760MPa)
- a-3: FC-30 半溶融鍛造(T=1162°C, p=760MPa)
- d-2: FCD-45 熱間鍛造→高温焼きなまし(T=1005°C, p=760MPa, 900×1h×炉冷)
- a-4: FC-30 半溶融鍛造→高温焼きなまし(T=1162°C, p=760MPa, 900×1h×炉冷)
- d-3: FCD-45 半溶融鍛造(T=1167°C, p=760MPa)
- b-1: FC-20 半溶融鍛造→高温焼きなまし(T=1000°C, p=760MPa, 900×1h×炉冷)
- d-4: FCD-45 半溶融鍛造→高温焼きなまし(T=1167°C, p=760MPa, 900×1h×炉冷)

図11 鑄鉄鍛造製品の中心部と周辺部における硬さ分布

4. ま と め

今回の実験結果をまとめて表3に示す。半溶融状態の特性を利用し、従来困難と考えられてきた鑄鉄の鍛造加工の可能性を示すとともに、固相成分と液相成分の変形・流動の特性、ピレット形状、型形状、冷却条件あるいは熱処理条件を有効に組み合わせることにより、表層部から中心部に向かって黒鉛の形状・寸法・分散、あるいは、硬さ・耐摩耗性など、製品特性を目的に応じて作り込んだ鑄鉄製品の製造が可能であることを示した。

(1989年9月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内 学・杉山澄雄: 平1春塑加講論, (1989), 57.