

薄肉球状黒鉛鑄鉄品の製造と材質特性

戸羽 篤也, 安田 星季, 櫻庭 洋平, 三戸 正道, 宮腰 康樹

The Casting Process of the Thin Spheroidal Graphite Cast Iron and Properties of the Material

Atsuya TOBA, Seiki YASUDA, Yohei SAKURABA
Masamichi MITO, Yasuki MIYAKOSHI

抄 録

薄肉球状黒鉛鑄鉄材の実用的な製造方法を見出すため、鑄鉄の材質に影響を及ぼす鑄造条件を適切に設定して鑄造試験を行い、板厚3 mm程度の薄肉球状黒鉛鑄鉄の板材を製作した。それらの塑性変形性を調べるため、製作した材料の特性を試験して塑性加工による追加工等の可能性を評価した。

キーワード：球状黒鉛鑄鉄, 鑄造, 材料特性

Abstract

This study was aimed for finding the useful process of making thin spheroidal graphite cast iron by examining with several casting conditions, and we could make some spheroidal graphite cast iron thin plate of 3mm thickness. We examined some properties of the materials for finding their plasticity, and we evaluated the possibility of additional processing with plasticity process.

KEY-WORDS : Spheroidal graphite cast iron, Casting, Properties of material

1. はじめに

近年、鑄鉄材料にも軽量化が求められ、薄肉球状黒鉛鑄鉄品の製法やその特性に関する研究成果がいくつか報告されている¹⁾。薄肉球状黒鉛鑄鉄は、鑄造時の冷却速度が速いことから湯廻り不良などの欠陥や“チル”と呼ばれる硬くて脆い組織が生じやすく、一般の鑄物製品に比較して製造が難しいとされている。

球状黒鉛鑄鉄の材質は化学成分、鑄造方案、注湯温度、溶湯処理法などの鑄造条件に影響を受けるが、これらを適切に選定すればセメントタイトの晶出を抑え、チルのない健全な材料を得ることができる²⁾³⁾。鑄造条件を適切に設定して延性

の高いフェライト基地の薄肉鑄鉄製品を安定して製造できれば、鍛造やプレス加工などによる追加工を施すことにより、鑄物製品の付加価値向上につながる可能性がある。

そこで、薄肉球状黒鉛鑄鉄の実用的な製造方法に関する知見を得るため、球状黒鉛鑄鉄の材質に影響を及ぼす鑄造条件を適切に選択して薄肉球状黒鉛鑄鉄板材を鑄造し、それらの材料特性を試験して塑性加工性を調べ、鍛造やプレス加工による鑄造材料の追加工などに関する考察を行なった。

2. 球状黒鉛鑄鉄の鑄造条件と材質特性

球状黒鉛鑄鉄は、その組織中に球状に晶出する黒鉛と、フェ

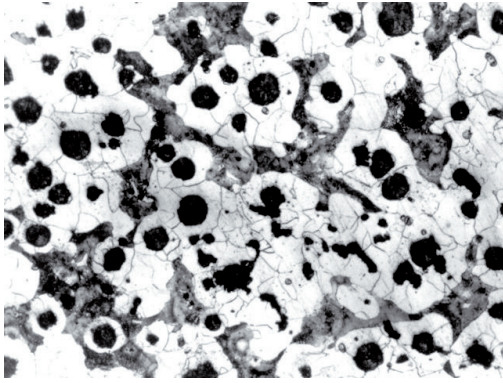


図1 球状黒鉛鑄鉄の組織

ライトと称する純鉄に近い組織，そしてフェライトとセメントタイト（鉄と炭素の化合物で硬くて脆い組織）の層状組織であるパーライトの大まかに3つの組織が観察される⁴⁾。

図1に球状黒鉛鑄鉄の代表的な組織観察写真を示す。写真中，点在する黒色の円形状のものが黒鉛であり，その周りの白色の部分がフェライト，その他の部分がパーライトである。

黒鉛は溶湯中の炭素が晶出して結晶化したもので，材料の強度には寄与しない。フェライトは延性に富み，伸びなどの塑性変形能に寄与する。パーライトは硬い組織を含んでおり，材料の硬さや引張強度に影響する。黒鉛は材料強度を評価する場合には欠陥として取り扱われる。フェライトの割合が大きい材料は強度や硬さは小さくなるが延性があり，逆にパーライトの割合が大きくなると強度や硬さが増す反面，伸びが出にくくなるという性質がある⁵⁾。

球状黒鉛鑄鉄の材質は日本工業規格⁶⁾で定められており，その参考規定として，FCD450以下はフェライトが主体の基地組織，FCD500～FCD600はフェライトとパーライトの混合組織，FCD700以上はパーライト主体の組織とされる。

組織の中で，黒鉛そのものは材料の強度に寄与しないが，黒鉛の量が多くなれば相対的に金属部分の比率が小さくなるので，例えば組織写真から算出される黒鉛の面積率が機械的性質に影響することになる。さらに，黒鉛の面積率が同じであっても，黒鉛形状（黒鉛の真円度を示す指標），黒鉛粒数（単位面積当たりの黒鉛の個数），黒鉛粒径（黒鉛の大きさの平均値）が異なれば，引張強さ，伸び，あるいは靱性といった材料特性に影響を及ぼす。

これらの材料特性あるいは微視組織は，鑄造時の諸条件による影響を受けることが知られており，目的とする材質を得るためにはこれらの条件を適切に選定する必要がある。

2.1 化学成分

鑄鉄は，主材料の鉄（Fe）に炭素（C）と珪素（Si）を多く含んだ合金であり，これにマンガン（Mn），硫黄（S），りん（P）などの元素を微量含んだ材料である。

鑄鉄に多く含まれる炭素は，鑄造後の冷却過程で溶湯の炭

素溶解度が小さくなると，飽和できる量以上の炭素は炭素単体か鉄との化合物（ Fe_3C ；「セメントタイト」という）として晶出する。どちらの形で晶出するかは，化学組成や冷却条件によって異なる。珪素などの黒鉛化を促進する効果のある元素を多く含んだ化学組成の溶湯では黒鉛が晶出しやすく，銅などの黒鉛化を阻害する元素が含まれるとセメントタイトが晶出しやすくなり，基地組織のパーライト率が増える⁷⁾⁸⁾。

2.2 冷却速度

鑄造後の冷却過程で過飽和の炭素が黒鉛として晶出するかセメントタイトとなるかは冷却速度の影響を大きく受ける。すなわち，冷却速度が小さくゆっくりと冷されるときは炭素単体の黒鉛として晶出しやすく，急冷されるとセメントタイトが晶出しやすくなる。冷却速度が極めて速いときには“チル”と呼ばれるセメントタイト単体の硬くて脆い組織が現れやすくなるが，“チル”が多く生じたものは不良あるいは異常組織とされ，特殊な用途に用いられる場合を除いて一般的には実用とされない。

冷却速度は，注湯温度や鑄型材の熱物性，鑄型砂と金属との重量比などによって決定されるが，鑄造後の冷却条件を設計し，目標の冷却速度となるように鑄型を設計することを“鑄造方案”と呼んでおり，薄肉球状黒鉛鑄鉄の製作では薄肉部でもチルの発生しない鑄造方案の工夫が不可欠である。

2.3 溶湯中の酸素・硫黄濃度

一般に鑄鉄溶湯をそのまま鑄込むと，黒鉛の形状は片状となる。片状の黒鉛形状となった鑄鉄材料は普通鑄鉄あるいはねずみ鑄鉄と呼ばれ，あまり強度の必要とされない部材に用いられている。これに対して，“黒鉛球状化処理”と呼ばれる溶湯処理を行って鑄型に鑄込むと，晶出する黒鉛の形状は球状となる。球状黒鉛鑄鉄は，機械的性質も優れた材料となるため，鑄鉄材料として用いられるかなり大きな割合を球状黒鉛鑄鉄品が占めている。

黒鉛が球状化する条件として，溶湯中の酸素濃度や硫黄濃度が低い場合に黒鉛が球状化しやすくなることが知られている⁹⁾。溶湯中の酸素濃度を低下させるためにマグネシウム（Mg）やカルシウム（Ca）を基材とした溶湯処理剤が市販されており，鑄造する直前にこれらの処理剤を溶湯中に添加して脱酸処理を行うことで球状黒鉛鑄鉄を得る。

2.4 接種処理

鑄造後の冷却過程で黒鉛が晶出する際に，溶湯中に異物質からなる晶出核が存在すると黒鉛の晶出が促進される。そこで，“接種”という溶湯中に晶出核となる物質を添加する処理を行い，黒鉛の粒数と粒径を制御する⁹⁾。

接種処理を行うと，溶湯中に黒鉛の晶出核が多く存在することから黒鉛の晶出が分散し，黒鉛粒数が多く黒鉛粒径は小

さくなる。材料の均質性や破壊靱性などの観点からも黒鉛は小さな粒が数多く晶出す方が望ましい。黒鉛化を促進する意味からも接種処理を行うのが一般的で、薄肉鑄鉄の製作においては必須の条件と考えられている。

3. 実験方法

3.1 薄肉球状黒鉛鑄鉄の鑄造試験

薄肉球状黒鉛鑄鉄の試験片を得るために、試験用の木型を製作し、これを用いて薄板状の試験片を鑄造した。

鑄造方案は、薄肉部分の冷却速度を下げるため、図2に示す“吐かせ方案”を採用した。すなわち、湯口から鑄込んだ溶湯は、図2の左側に設けたセキを通じて左側の駄肉部分に満たされた後、薄板部分を通して右側の駄肉部分に移動する。

この際、薄板部分の鑄型は溶湯移動中の熱交換によって加熱される。鑄型内の空隙が全て溶湯で満たされてから冷却過程に進む段階までに、鑄型がかなり加熱されているので薄肉部分の冷却速度を遅くする効果が得られる。

試験片の大きさは、板材として供試できる部分の寸法で幅を60mm、長さを300mm、板厚を3mmとした。使用した木型（上型、下型）の写真を図3に示す。

また、同じ溶湯で板厚の違いによる組織の変化を確認するため、300mm長さ部分を80mmずつの3つの領域に区分けし、それぞれ2mm、4mm、6mmの板を製作できるようにした鑄型も用意して試験を行った。

鑄造した鑄鉄材料の化学成分は表1に示す目標組成とし、標準的な球状黒鉛鑄鉄品の化学成分を基に多少C%を高めに設定した。

材料の溶解は、高周波電気誘導炉（80kW）で約50kgの材料を溶解し、CEメータを用いて化学成分を確認、成分調整を行った後、約1,400℃まで昇温した。

鑄造に先立って、Mg基材の脱酸材を電気炉内の溶湯中に

添加して脱酸処理を行い、除賽等を行った後、取鍋に約20kg程度の溶湯を移してから球状化処理を行い、速やかに鑄型に鑄込んだ。

接種は、鑄型内の湯道部に接種材を予め配置する“鑄型内接種法”とし、接種材にはFe-Si（50%）を粒状に破碎して用いた。

3.2 球状黒鉛鑄鉄の材質試験

製作した球状黒鉛鑄鉄の薄板試験片を用いて、それらの機械的性質を調べた。

試験片は、抜型、砂落としを行った後、湯口および吐かせ方案に用いた駄肉部分を切断して得られた板状試験片の両面を平面研削盤で鑄肌の凹凸がなくなるまで研削した。その後、板状試験片を帯鋸盤で縦方向に3分割に切断し、図4に示すような引張り試験片に加工し、万能試験機で引張強度を試験した後、破断伸びとブリネル硬さを計測した。

伸びは、並行部に25mm幅でケガキ線を入れ、引張試験後の試験片のケガキ線幅を計測してその増分を元の長さで除して算出した。また、ブリネル硬さは、試験片厚さが薄いことから、圧縮荷重を15kNに設定して計測した。

引張試験、伸び計測、硬さ試験の後、同引張試験片のつかみ部の一部を切り出して樹脂に埋め込み、エメリー紙等で研磨して組織観察を行った。

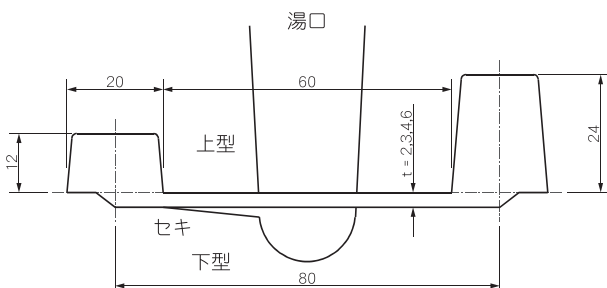


図2 鑄造試験の方案（吐かせ方案）

表1 鑄造試験に用いた溶湯の化学組成

C	Si	Mn	P	S
3.8	2.4	0.14	0.08	0.02



a) 上片用木型



b) 下型用木型

図3 鑄造試験に用いた木型

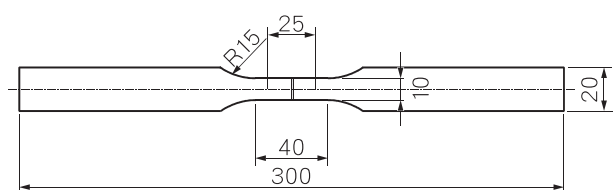


図4 薄板引張試験片の寸法（JIS Z 2201 14号B）

4. 実験結果および考察

4.1 薄肉球状黒鉛鑄鉄の製作

前章3.1項の実験条件により鑄造を行い、薄肉球状黒鉛鑄鉄の試験片を製作した。

製作した鑄物の一例を図5に示す。上の写真は、製作した鑄物の全景である。また、その下の写真は、薄板部分を真横から撮影した写真である。さらに、駄肉部分の表面を観察すると外引けの発生が認められたことから、この駄肉部分は“押し湯”としても機能していたことがわかった。

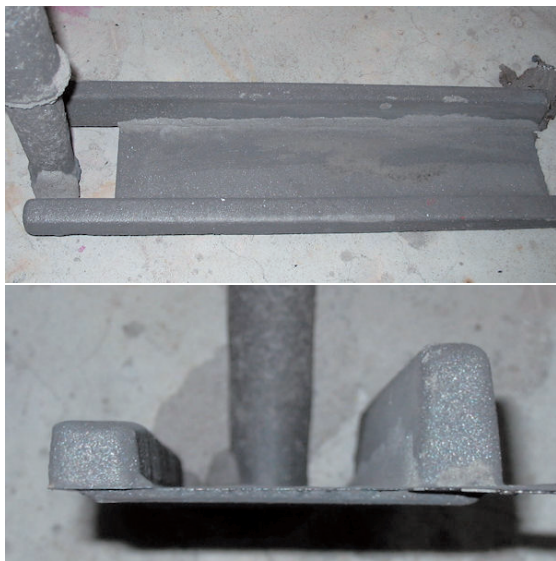


図5 鑄造実験により得られた鑄物試験片

鑄造試験により、方案等の鑄造条件を適切に選ぶことにより、板厚3mm程度でも、湯廻り不良などのない健全な鑄物が得られた。

ただし、試験を進める過程で溶湯処理中に温度が下がって注湯温度が低くなった試験鑄物の中には、薄板部分の湯境が生じたり、一部に湯廻り不良を起こしたりする試験体も散見され、鑄造温度の管理が重要であることがわかった。

冷却速度を遅くした方が凝固過程で黒鉛の晶出が促進される効果があるため、薄肉鑄鉄の鑄造では冷却速度を制御してチルの発生を抑えるためには注湯温度が高いことは有利である。しかし、一方で溶湯温度が高くなると黒鉛球状化処理のために添加した球状化剤の反応が早く進み、球状化処理効果が利いている時間が短くなる“フェーディング現象”が問題となる。過度に溶湯温度を上げることは、投入エネルギーの無駄につながるだけでなく、フェーディングを遅らせるために球状化処理剤の余分に添加しなければならないなど、製造コスト面からは不利となる。

冷却速度とフェーディングとはトレードオフの関係にあり、これらの両方を考慮して溶湯の溶解温度を管理しなければならない。

4.2 材質試験

鑄造実験で製作した鑄物の機械的性質を調べた。試験片は、鑄物の湯口および駄肉部分を切り離して幅60mm、長さ300mmの板状の鑄物を切り出し、鑄肌の条件を除外するためにこれら鑄物の薄板の両面を平面研削盤で鑄肌が残らなくなるまで研削した。研削後の試験片の写真を図6に示す。さらに、これらから引張試験用の試験片を製作するために、縦方向に3分割し、フライス盤を用いて平行部を加工して図7に示す形状に仕上げ、後で伸びを測定するためにそれらの平行部の中心に25mmの幅でケガキ線を入れた。

試験に供した材料は、鑄造試験を行って得られた鑄物のうち、外見上の欠陥が見られなかった4つを選定した。試験結果を示す便宜上、これらの供試材をTP①～TP④と称することとし、それぞれを3分割した後の引張試験用試験片を片側から順にTP①-1, TP①-2, TP①-3のように呼ぶことにする。

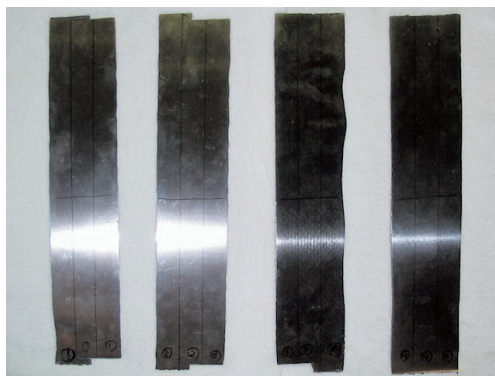


図6 研削により鑄肌を削り取った試験片

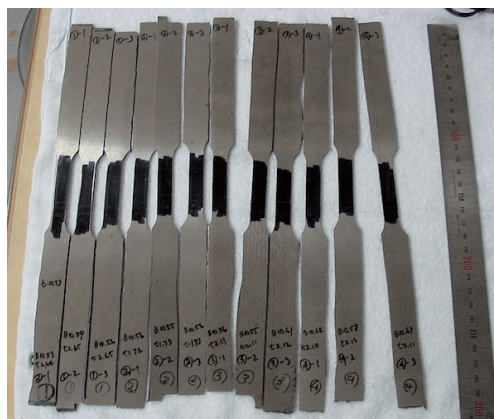


図7 引張試験用に機械加工した試験片

表2 試験片平行部の板厚・幅

試験片	幅 [mm]	板厚 [mm]	断面積 [mm ²]
TP①	10.56	2.65	27.98
TP②	10.56	1.73	18.27
TP③	10.57	2.11	22.30
TP④	10.59	2.11	22.34

引張り試験に先立って、各試験片の平行部の板厚と幅を計測した。その結果を表2に示す。

これらの試験片を用いて、引張強さ、伸び、ブリネル硬さを計測した。これらの計測結果を表3にまとめた。引張強さは一部の試験片（TP③）で小さな値が計測されたが、概ね450MPa以上の強度が得られ、ブリネル硬さはいずれの試験片でも150～170の範囲で計測された。また、伸びはTP④では全ての試験片で10%以上の伸びが計測されたほかは、試験片によってバラツキが大きかった。

これら引張強さと硬さの値から、鋳造試験で製作された薄肉球状黒鉛板材の材質はFCD450相当のものと判断される。日本工業規格によると、FCD450は10%以上の伸びが求められているが、伸びの計測値が安定していたTP④以外はこの規格を満たしてはいなかった。

引張試験後のそれぞれの試験片のつかみ部分を切り出して組織観察を行った結果を、図8の写真に示す。写真はいずれも板状試験片の中央から切り出した引張試験片の断面の組織を観察したものである。

TP①とTP②は、ほぼ同じ組織が観察され、黒鉛以外の基地組織はほとんどがフェライトの組織であった。ただし、こ

の基地組織を詳細に見ると、球状の炭化物（セメントライト）と思われる組織も観察された。

TP③は、基地組織に急冷によって生じやすい“チル”の針状組織が観察された。しかしながら、TP③のブリネル硬度を前者のTP①、TP②と比べてそれほど大きな違いはなく、この種の材質については今後の検討課題を残した。

TP④はTP①、TP②とTP③の中間的な組織であり、基地組織中にパーライトが分布している様子が観察された。一般的にFCD450の基地組織は、全てがフェライトかフェライト主体で少量のパーライトを含む組織となることが知られているから、TP④の組織観察からもほぼFCD450相当の薄板が製作できたものと考えてよい。

黒鉛について観察すると、黒鉛形状に関しては80%以上の黒鉛球状化率が得られた。黒鉛粒数は、目測ではあるが概ね1,800個/mm²程度、黒鉛粒径は大きいもので50μm、平均すると大体10～20μmである。黒鉛の形状、粒数、粒径は、いずれの試験片も大きな差がなく、微細な黒鉛が数多く分散しているので、接種の効果が十分に効いているものと判断される。

4.3 塑性加工性に関する考察

鋳造は、複雑な形状の金属製品を最も低コストで加工できる方法である。しかし、耐火性鋳型に溶融金属を注入して鋳型内を満たしてから冷却して凝固させ、室温まで温度を下げて製品にするので、鋳造品に精密な寸法を期待するのは困難である。一部、ダイカスト法やロストワックス法のように鋳造で最終製品の寸法精度を実現することを重視した鋳造プロセスも開発されているが、それぞれ独自の高度なノウハウが必要であったり、試行錯誤の過程を経て量産につなげる手法をとらざるを得なかったりして初期経費が大きくなり、特殊な材料や付加価値の高い鋳物製品にしか適用されない。

従って、鋳鉄部品で寸法精度が要求される部位は、一般に切削機械加工が施されている。そこで、薄肉でかつ塑性変形性に富んだ鋳鉄材料に対しては、鍛造やプレス加工による寸法出しや穴あけ加工などの追加加工に可能性が出てくる。近年普及しつつある“サーボプレス装置”は、従来のプレス機ではできなかった自由度の高い加圧・変位制御ができる。これにより、塑性加工時の加圧条件と鋳鉄の塑性加工性に関する研究が進めば、素材を低コストで大量に製造できる鋳造と加圧条件制御可能なプレス加工の組み合わせで、従来にない量産型の精密金属部品を製作する手法を確立できるのではないかと期待している。

そのためには、鋳鉄素材の品質を安定して生産する技術が必要になる。鋳造条件のうち化学成分や溶湯処理が標準化されている場合、鋳鉄材料の組織に影響を及ぼす因子として最も大きいのは鋳造後の冷却条件である。同じ溶湯を一つの鋳型に鋳込んで、肉厚が異なれば冷却条件も異なり、組織も

表3 薄肉球状黒鉛鋳鉄板の機械的性質

試験片	引張強度 [MPa]	伸び [%]	ブリネル硬さ [HB 10/1500]
TP①-1	463	11.6	166
TP①-2	461	7.9	163
TP①-3	442	4.3	165
TP②-1	453	5.7	169
TP②-2	481	8.9	165
TP②-3	482	6.7	170
TP③-1	399	3.9	162
TP③-2	452	7.8	156
TP③-3	422	3.4	165
TP④-1	471	13.2	162
TP④-2	475	16.6	150
TP④-3	488	11.6	163

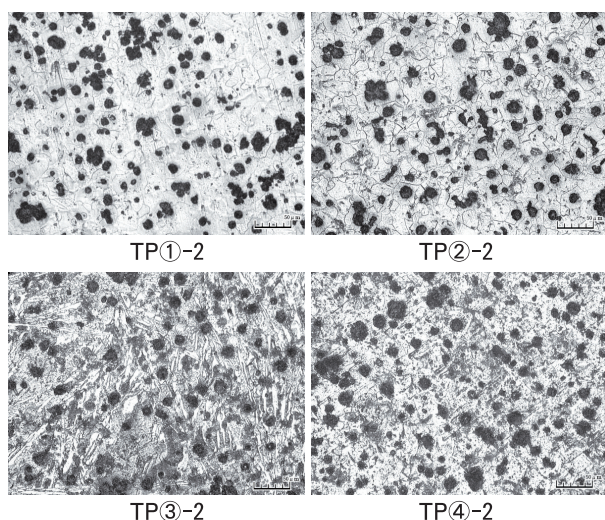


図8 試験片の組織写真

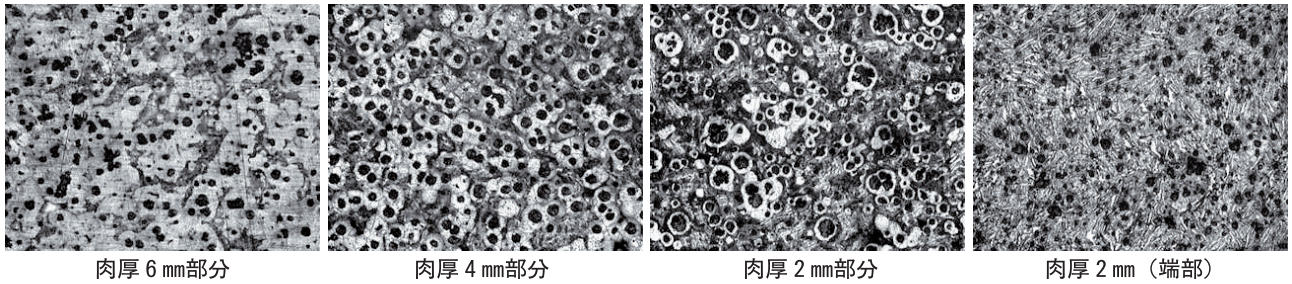


図9 肉厚変化による冷却速度の違いと球状黒鉛鑄鉄の基地組織

異なったものとなる。

本試験を進める過程の予備実験として、同じ溶湯、同じ鑄型内で肉厚の異なる板材を鑄込んでみた。板材の幅60mm、各板材の長さを80mm、板厚はそれぞれ2 mm、4 mm、6 mmとして鑄造試験を行って得られた鑄物試験材の組織観察結果を図9に示す。

写真の左側から順に板厚6 mm、板厚4 mm、板厚2 mmの各部分から切り出した断面の組織観察を行った写真である。最も右側の写真は板厚2 mmの端部で最も急冷されると予測された部分から切り出して断面の組織を観察した写真である。

いずれも、黒鉛形状は球状化しており、黒鉛の粒数および粒径は、板厚2 mm部分の写真の黒鉛粒径が若干大きいように見えるが、特に大きな差異があるとはいえない程度である。

ここでは基地組織に注目したい。鑄鉄は鑄造後の冷却過程で急冷されるとセメントライトが晶出しやすくなるため、基地組織にセメントライトやパーライトの組織が現れやすくなる。図9でも肉厚が薄くなるにつれて生地組織のパーライトの量が増加している様子が認められる。

すなわち、板厚6 mmでは、基地の主体はフェライトであり、若干のパーライトが見られる組織であるが、板厚4 mm、板厚2 mmでは黒鉛周辺だけにフェライトが分布する、球状黒鉛鑄鉄特有の“ブルスアイ”組織が見られる。また、フェライト組織の割合は板厚4 mmより板厚2 mmの方が少なくなっている。さらに板厚2 mmの端部では基地組織が他の写真と異なり、全面チル組織で覆われている。

このように、冷却速度は鑄鉄基地組織中のフェライト量に大きく影響するため、材質制御を目的とした鑄造条件パラメータとして重要な因子に位置づけられる。

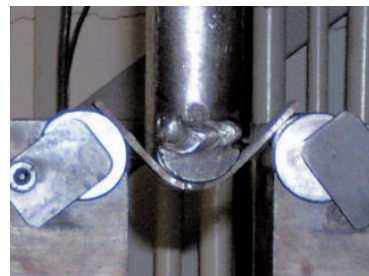
実際の鑄物製品では、肉厚寸法は製品設計上の要求項目なので、これを変えることはできない。そこで冷却速度を目的の値に設定するとすれば、駄肉を設けて鑄型を予熱するような鑄造方案上の工夫による手法が考えられる。しかし、駄肉を付与することによって製品歩留りが低下することによる生産コストのアップは考慮しなければならない。

球状黒鉛鑄鉄の基地組織制御の方法としては、合金元素の添加による方法も知られているが、この場合も添加材料が増えることによるコストアップを考慮しなければならない。

どちらの方法を選択するかは個々に事情が異なるであろう

が、凝固数値解析システムなどの鑄造CAEを利用して予め冷却速度を見積もり、湯道や押し湯などの位置関係を変えてみるなどの方法も有効であろう。

また、この予備実験の過程で鑄鉄材料の塑性変形性を調べるため、薄肉球状黒鉛鑄鉄の板材の曲げ試験を行った。試験は厚さと材質の異なる板材を用意し、図10-a)のような状態で3点曲げを行った。概ね90度の角度になるまで荷重を加えたが、途中で亀裂が発生したり、破断したりした場合はそこ

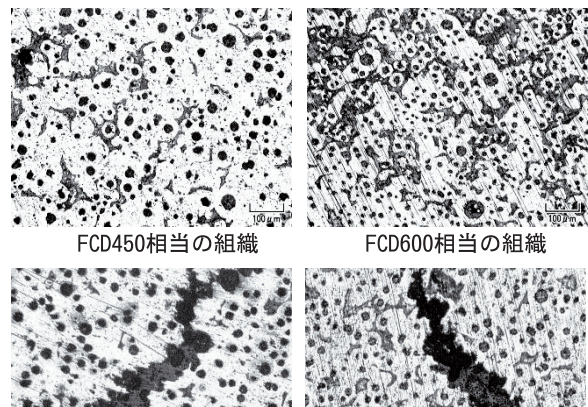


a) 曲げ試験の様子



b) 曲げ試験後の試験片

図10 薄肉球状黒鉛鑄鉄の曲げ試験



上記材料の破断部 上記材料の破断部

図11 曲げ試験後の試験片の組織写真

で止めた。図10-b)は除荷後の試験片の写真である。供試材はFCD450相当品とFCD600相当品の2種を用いたが、FCD450の薄板以外は全て経過途中で亀裂が発生した。図11は、試験片とそれぞれの亀裂部分の組織写真を示している。

FCD450とFCD600では、基地組織のパーライトの量が異なるが、亀裂発生部分に注目すると、FCD600の破断部は亀裂が黒鉛間の基地組織を伝播して亀裂が進展しているように見えるのに対して、FCD450にはこれに加えて黒鉛形状にも変化が見られる。すなわち、球状黒鉛付近のフェライト基地が、曲げ試験で引張り荷重が加えられた方向に引き伸ばされて変形し、破断に至るまで塑性変形している様子が観察された。

また、亀裂周辺の黒鉛形状は、もともと真円形に近かったものが楕円状に引き伸ばされたようにも見える。このとき黒鉛が変形することは考えにくく、恐らくは引張り応力によって黒鉛と基地組織のフェライトの界面に空隙ができ、そのフェライト組織が変形したものであろう。

FCD450のように基地組織中に延性に富んだフェライトが多く含まれると材料の塑性変形性が増し、薄肉球状黒鉛鋳鉄でFCD450相当の材料が製造できれば、その後の塑性加工による追加工ができる可能性があるものと判断される。

5. まとめ

軽量化などのニーズから需要が高まっている薄肉球状黒鉛鋳鉄品の付加価値を高める方法の一つとして、鋳造後の塑性追加工の可能性を探るべく鋳造実験を行い、薄肉鋳物の製造方法と材質制御に関する知見を得た。

フェライト基地の薄肉球状黒鉛鋳鉄の実用的な製法に関しては、化学成分、鋳造方案、溶湯の脱酸・接種処理などの鋳造条件を適切に設定することにより、板厚3mm程度の無チル球状黒鉛鋳鉄を製造することができた。

製作した薄肉球状黒鉛鋳鉄の機械的性質を調べたところ、板厚3mmの板状試験片でもFCD450相当の材質が得られることを確認した。また、曲げ試験結果などからフェライト率の高いFCD450相当の材料において塑性追加工の可能性を認めた。

今後は、今回の試験で得られた知見をもとに、鋳鉄品への鍛造・プレス加工による追加工に関して、加工品質、コストメリット等の視点からその有効性を調べる研究に展開していく予定である。

引用文献

- 1) 堀江 皓・小綿利憲：薄肉球状黒鉛鋳鉄の開発研究，鋳鍛造と熱処理，(1988.5)
- 2) 張 博・明智清明・埜 健三：球状黒鉛鋳鉄，(1983.3)

- 3) 井川克也・喜多新男・草川隆次・新山英輔・松本 弘：球状黒鉛鋳鉄の基礎と応用，(1992.4)
- 4) 球状黒鉛鋳鉄品の標準顕微鏡組織写真集，(株)日本強靱鋳鉄協会，(1986.7)
- 5) 小綿利憲・堀江 皓・雷 富軍・崔 洋鎮：薄肉球状黒鉛鋳鉄の機械的性質の評価，鋳造工学 Vol.73，(2001.4)
- 6) 日本工業規格：JIS Z 5502，球状黒鉛鋳鉄品
- 7) 堀江 皓・宮手敏男・斉藤 実・小綿利憲：薄肉球状黒鉛鋳鉄のチル生成に及ぼす炭素，珪素及び黒鉛粒数の影響について，鋳物 Vol.56，(1984.8)
- 8) 堀江 皓・小綿利憲・阿部喜佐男・千田昭夫：薄肉球状黒鉛鋳鉄の黒鉛粒数に及ぼす希土類元素の影響，鋳物 Vol.57，(1985.12)
- 9) 鄭 想勲・井上博文・吉田 誠・中江秀雄：Fe-C合金の黒鉛形態に及ぼす硫黄と酸素の影響，鋳造工学 Vol.78，(2006.4)