

ヤング率を向上させた低熱膨張球状黒鉛鑄鉄の引け性と鑄造品の試作

藤川貴朗*, 近藤義大*

Shrinkage Properties of Low Thermal Expansion Spheroidal Graphite Cast Iron more than 120 GPa of Young's Modulus and Trial Casting Products

Takao FUJIKAWA, Yoshihiro KONDOH

Key words: Shrinkage Property, Spheroidal Cast Iron, Low Thermal Expansion, Young's Modulus

1. はじめに

超精密機械の構造部品用材料として低熱膨張性を有する鑄鉄¹⁻³⁾がある。これは、インバー合金の軟質材で切削加工性が悪いなどの問題点を、鑄鉄の良好な鑄造性で補おうとするものである⁴⁾。しかしながら、極低熱膨張性の球状黒鉛鑄鉄系の材質(平均線熱膨張係数 α が $2.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 程度)では、常温でブリネル硬さ HB が 120~130 程度、引張強さが 450 MPa 程度に、さらに、実際の鑄造品ではヤング率が、100 GPa 程度になってしまうと言われている⁵⁻⁷⁾。

そこで、低熱膨張性球状黒鉛鑄鉄において、低熱膨張特性と切削加工特性を両立させるため、熱膨張係数、硬さ、ヤング率の目標を設定し、それを満足するための材料の化学組成を調べた。さらに、健全な鑄造品を製造するために必要な基礎的な鑄造特性の把握のため、低熱膨張球状黒鉛鑄鉄の引け特性を評価するとともに、試作品としてポンプ部品の鑄造を行った結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料の溶製と機械的性質の測定

高純度銑鉄、鋼屑、フェロシリコン、加炭材(電極棒黒鉛くず)、フェロマンガ、硫化鉄、電解ニッケル、電解コバルト、Ni-5%Mg 合金、接種材(Fe-Si-Ca-Ba-Al 合金)を用いて、高周波誘導

溶解炉にて炭素当量(以下 CE 値という)の異なる表 1 の供試材(試料番号を LT03~LT09 とする)を溶解量 30 kg で溶製した。ここでは、C 量 + (Si 量/3) + (Ni 量 $\times 0.05$) + (Co 量 $\times 0.03$) を炭素当量とした。これを肉厚 25 mm の Y ブロック鑄型(JIS G 5502 B 号)に鑄造し、Y ブロック下端から JIS Z 2241 4 号引張試験片に加工した。この試験片にて引張強さ、耐力、ヤング率を測定し、試験片のチャック部から切り出した試験片にてブリネル硬さを測定した。

具体的目標値としては、25 mm Y ブロックに鑄造した場合における、常温から 200 °C までの平均線膨張係数が 2.0×10^{-6} 以下、黒鉛粒数が 150 個/mm² 以上、ブリネル硬さ HB160 以上、ヤング率 120 GPa 以上である。コーディエライトは色調、粒径の異なる 6 種類(コーディエライト A~F)の市販合成物を使用した。その化学組成を表 1 に示す。

2.2 黒鉛粒数測定方法

引張試験片のチャック部から試料を採取し、肉厚 25 mm での鑄造組織の黒鉛粒数を測定した。粒数測定は JIS G 5503 (新 JIS 法)に拠ったが、今回の供試材の粒径は JIS 規格が想定する粒径より小さいので、測定対象としない粒径のカットオフ値は 1 μm と変更した。

2.3 熱膨張係数測定方法

熱膨張率測定は、機械的性質の目標を達成している CE 値の低い試料 LT05 について実施するこ

* 金属研究室

表 1 供試材の化学組成 (mass%)

試料 No	C	Si	Mn	P	S	Ni	Co	Mg	CE
LT03	0.76	0.17	0.10	0.011	0.002	31.8	5.2	0.022	2.56
LT04	1.28	1.05	0.18	0.012	0.002	32.6	5.3	0.039	3.42
LT05	0.78	0.24	0.18	0.007	0.003	32.7	5.3	0.032	2.65
LT05-2	0.76	0.20	0.16	0.012	0.002	32.4	5.1	0.030	2.60
LT06	0.96	0.30	0.14	0.007	0.001	32.5	5.3	0.050	2.84
LT07	0.94	0.36	0.20	0.005	0.002	33.5	5.3	0.029	2.89
LT07-2	1.06	0.22	0.17	0.015	0.003	32.6	5.3	0.030	2.92
LT08	1.18	0.56	0.18	0.006	0.002	35.1	5.5	0.042	3.29
LT09	1.32	0.98	0.21	0.007	0.002	34.1	5.4	0.045	3.51
LT09-2	1.48	0.86	0.18	0.007	0.002	32.2	5.1	0.035	3.53

ととした。引張試験片を採取した Y ブロック位置直上から、水平位置で、径 5 mm 長さ 50 mm の熱膨張率測定用試験片を切削加工にて切り出した。熱処理条件は、鑄放し、923 K (650 °C) 4 時間保持後炉冷、1123 K (850 °C) 2 時間保持後水冷、1273 K (1000 °C) 2 時間保持後水冷の 4 種 (いずれも大気中、熱処理後表面をサンドペーパーで仕上げ) とした。熱膨張は、熔融石英製熱膨張計にて、7 K/min の昇温速度で 20 °C から 400 °C まで測定し、熱膨張係数は 20~200 °C までの平均線膨張係数で表した。

2. 4 引け特性の評価

鑄造品の凝固時の引け特性を評価するため、2.1 節と同様な材料で、表 1 の LT05-2, LT07-2, LT09-2 の 3 種の材料を鑄造した。

凝固時に体積収縮を伴う鑄造品は、鑄物中心部の最終凝固部に引け巣を生じるが、その生成傾向は、鑄物の冷却速度に依存する。このため、鑄物の引け特性は鑄造品の体積と表面積の比を用いた鑄物モジュラス M に整理して取り扱われる。

$$M=V(\text{鑄物の体積})/S(\text{鑄物の表面積}) \quad (\text{cm})$$

ここでは、図 1 に示すように、4 種のモジュラスの異なる引け試験片に低熱膨張鑄鉄を鑄造した⁹⁾。図 2 に試験片の形状を、表 2 に寸法を示す。引け試験片は縦方向に中心部で切断し、その断面に現れた引け巣の面積を方眼紙に写し取って測定した。本研究では、試験片上部に出来やすい外ひきは程度が小さいので考慮しなかった。なお、鑄物の種類はアルカリフェノール樹脂有機自硬性鑄型とした。本実験の引け試験片の鑄物モジュラス



図 1 鑄物モジュラスの異なる引け試験片のマッチプレート

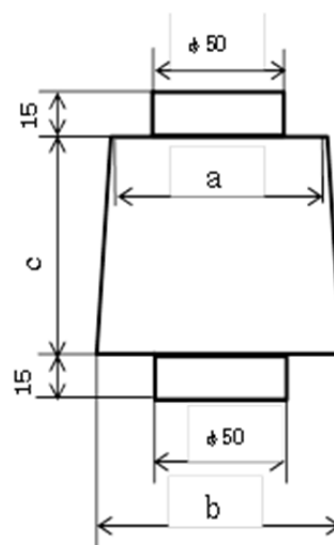


図 2 引け試験片の形状

表 2 引け試験片の寸法

番号	a (φ mm)	b (φ mm)	c (mm)	モジュラス (cm)
1	58	65	50	1.2
2	68	76	72	1.25
3	78	82	80	1.28
4	88	93	91	1.34



図 3 試作したポンプ部品

は、試験片の小さいものから順に 1.20, 1.25, 1.28, 1.34 であり、モジュラスが大きいほど押湯として利用する場合に有効である。

2. 5 試作品の製造

図 3 に示すように、単重 2.5 kg 程度のポンプ部品に LT05-2, LT07-2, LT09-2 の 3 種の材料を試作製造した。鑄型は CO₂ 鑄型とし、硬化後 105 °C のオーブンにて 2 時間乾燥させたのちに鑄造する。この部品はローター中央に引け巣が生じるが、これを押湯にて防止するための鑄造条件を探索した。この時の押湯の鑄物モジュラスは、小押湯で 0.89, 大押湯で 1.14 程度の円筒形とし、鑄物本体のモジュラスは形状から求めた概算値で 0.72 程度になる。

表 3 供試材の機械的性質

試料 No	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	硬さ (HB)	ヤング率 (GPa)
LT03	583	380	20	170	123
LT04	390	320	7.6	180	100
LT05	537	363	17.5	195	113
LT06	487	378	8.9	184	114
LT07	311	265	4.4	175	104
LT08	264	225	7.3	169	77
LT09	286	243	5.8	163	81

3. 実験結果

3. 1 供試材の化学組成および機械的性質

表 1 に供試材の化学組成を示す。ここでは CE 値を 2.5~3.5 の範囲で変化させた。表 3 に供試材の機械的性質を示し、図 4 に CE とヤング率の関係を示す。ヤング率は CE 値が少ないほど向上した。供試材 LT03 ではヤング率が 123 GPa となり目標とする 120 GPa に到達した。CE 値が低いほど材料中の黒鉛量（体積率、面積率とも同じ）が減少することになり、機械的強度の低い黒鉛が減少するので、引張強さ、耐力、ヤング率とも向上すると考えられる。硬さも同様であり、CE 値が低いほど硬度は高く HB180 程に達した。ブリネル硬さは、低いと切削加工時の切粉が連続してしまい切削性を劣化させるが、反対に硬すぎても工具を摩耗させるので、HB160 程度を狙いとしたが、おおむね良好な結果が得られたと言える。

3. 2 供試材の組織

図 5 に肉厚 25 mm Y ブロック試験片の場合の供試材の CE 値と黒鉛粒数の関係を示す。CE 値

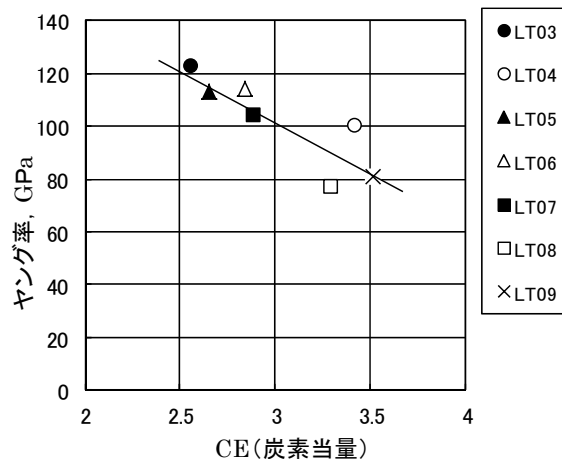


図 4 CE (炭素当量) とヤング率の関係

が 2.7 以下の場合黒鉛粒数が増加して、140 個/mm² となり目標の 150 個/mm² をほぼ達成した。

3. 3 熱膨張係数

表 4 に熱膨張係数の測定結果を示す。測定したのは試料 LT05 である。熱処理条件 1273 K 2 時間保持後水冷のものが最も平均熱膨張係数が小さくなった。

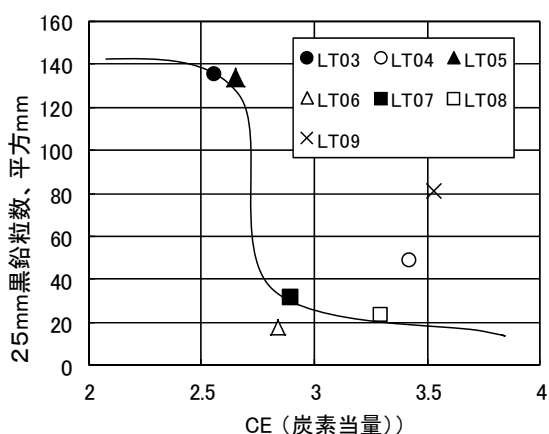


図5 CE (炭素当量) と Y ブロック 25 mm の黒鉛粒数の関係

表4 試料 LT05 の熱膨張係数測定結果

条件	20~200 °C × 10 ⁻⁶
鑄放し	2.1
923K 炉冷	1.9
1123K 水冷	1.6
1273K 水冷	1.5

3. 4 引け特性の評価

図6に鑄物モジュラスを変化させた試験片の断面写真を示し、図7に試験片の引け巣面積の測定結果を示す。引け巣の面積は炭素当量が小さいほど大きく、かつ鑄物モジュラスが大きいほど大きい。これは鑄物の冷却が遅いほど引け巣が顕著になることを示す。この円筒状の試験片を押湯として使用する場合は、モジュラスが大きく凝固が遅れて進行し溶湯がマッシュイであるほどその押湯効果は大である。また、アルカリフェノール鑄型に鑄湯した場合は窒素等による表面ガス欠陥は生成しなかった。また、鑄造品の表面部を0.5 g採取し、赤外吸収法にて窒素含有量を測定したところ、33 ppm程度であった。

3. 5 試作品の鑄造

図8に試作したポンプ部品のローター部中央に生じた外に開口した引け巣を示す。この収縮による引け巣は材質 LT05, LT07 では防止することが出来ず、比較的高 CE 値である LT09 で、モジュラス 1.14 の大押湯を設けて図9のように防止す

ることが出来た。

また、試作品の寸法収縮率(伸び尺)は、長さ400 mmの長尺品で10/1000であった。

4. 考察

本実験で調査した球状黒鉛鑄鉄は Ni 32%, Co 5%をベースとする合金であり、基地組織は全オーステナイトであって、その中に球状の黒鉛が分布している。したがって、CE 値が低いほど黒鉛の体積率(面積率にも同じ)は小さくなり、ヤング率は黒鉛の存在しないインバー合金の160 GPaに近づいてしだいに大きくなった。硬さも同様で、CE 値が低いほど硬くなる傾向にある。オーステナイトの硬さについては、結晶中の炭素、珪素等の合金元素による固溶硬化の影響も考えられるが、本研究の場合は、黒鉛体積率の減少の影響の方が大きかったと考えられる。本研究の CE 値の範囲は通常球状黒鉛鑄鉄の4.5程度より低いので、粒数をカウントした黒鉛は共晶黒鉛というよりオーステナイトからの固相析出黒鉛である可能性がある。

低膨張球状黒鉛鑄鉄の加工特性向上のため設定したヤング率、硬さは CE 値 2.7 以下の化学組成の条件で得られた。この時熱膨張係数は熱処理により、鑄放し状態より小さく改善できる。この効果はオーステナイト中の Ni, Co などの偏析が拡散によって解消することによると言われており⁹⁾、本実験でも改善効果があり、 1.5×10^{-6} の熱膨張係数が得られた。

図6に示したように本研究の低熱膨張性球状黒鉛鑄鉄の引け性は、CE 値に大きく依存する。また、鑄物モジュラスが大きいほど、鑄物中心部に引け巣を生じやすい。これを押湯として利用すれば、製品に生じる引け巣を防止することが出来る。押湯の大きさを決定するための簡易法では、鑄鋼製品のモジュラスと押湯のモジュラスの比は1.3~1.5以上と言われており¹⁰⁾、試作品で大押湯を用いた場合約1.5であるから、本材質は CE 値が比較的高ければ十分押湯が効くと考えられるが、CE 値が低ければ、凝固中の溶湯は流動性が無く押湯が効かない。

5. まとめ

低膨張球状黒鉛鑄鉄の加工特性向上のため、硬





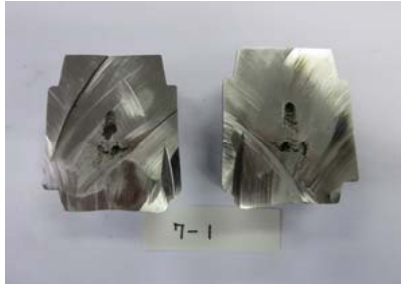
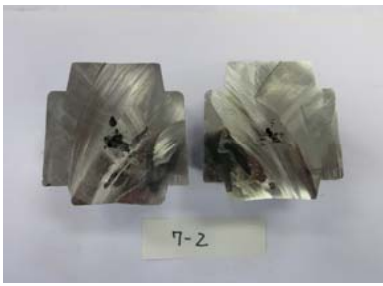

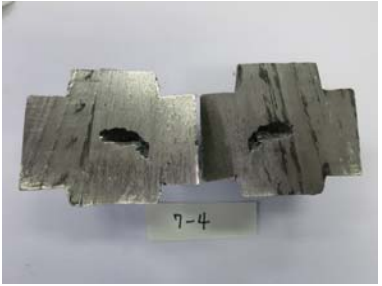
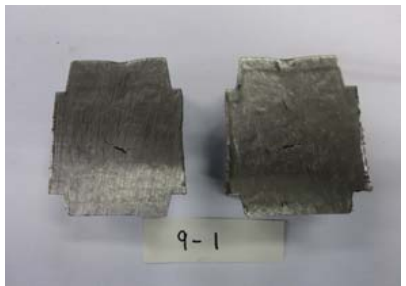
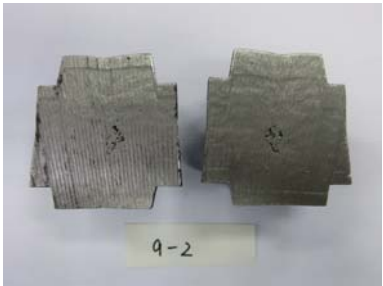

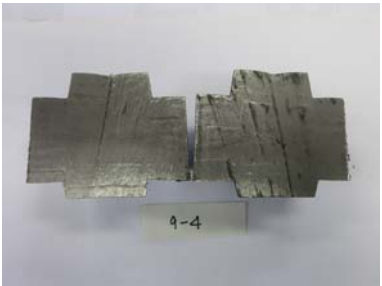
	1	2	3	4
LT05-2	 <p>5-1</p>	 <p>5-2</p>	 <p>5-3</p>	 <p>5-4</p>
LT07-2	 <p>7-1</p>	 <p>7-2</p>	 <p>7-3</p>	 <p>7-4</p>
LT09-2	 <p>9-1</p>	 <p>9-2</p>	 <p>9-3</p>	 <p>9-4</p>

図6 引け試験片の切断面

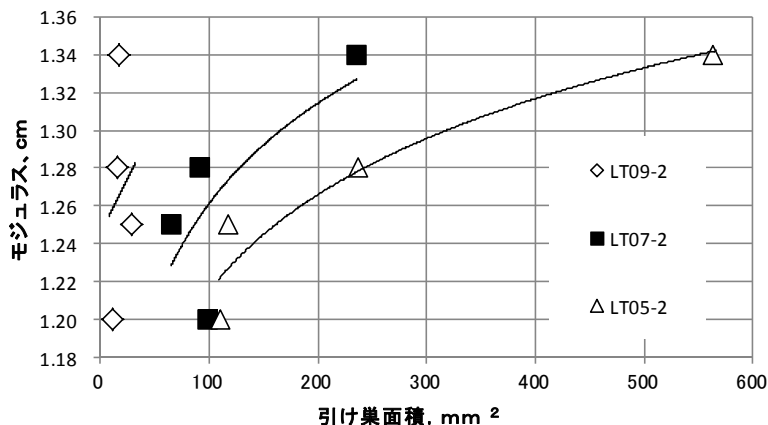


図 7 鋳物モジュラスと引け巣の面積の関係



図 8 試作した部品に生じた巣



図 9 大きな押湯により引け巣を防止

さ、黒鉛粒数、ヤング率の目標を設定し、これを満足する化学組成を決定した。この材料について、引け特性を調査し、試作品を鋳造した結果は以下の通りであった。

(1)炭素当量 (CE) 値を 2.7 以下にすることによって材料中の黒鉛が微細化され、機械的性質の目標を満足するヤング率 120 GPa の低膨張鋳鉄材料が得られる。

- (2)低膨張鋳鉄は熱処理により熱膨張係数を小さくできる。
- (3)炭素当量 (CE) 値が低いと、この材料は引け性が強く、鋳物に巣が生じる。これを押し湯によって防止するには、CE 値が 3.5 以上の条件のとき、押し湯と製品の鋳物モジュラスの比が 1.5 以上必要である。

参考文献

- 1) 北川鉄工：“NC 旋盤のタレットヘッド”素形材, 31(1), p7 (1990)
- 2) (株) 東芝ほか：“シリコンウェーハ用低膨張ポリッシング定盤”素形材, 31(1), p27 (1990)
- 3) JIS G 5511(1991)：“鉄系低膨張鋳造品”，
- 4) 生井亨：“新しい素形材—低熱膨張鋳造材”，鋳鍛造と熱処理, 42(1), p21 (1989)
- 5) 三重県工業研究所金属研究室：平成 21 年度ものづくり実証等支援事業受託試験研究報告書 (2010)
- 6) 水谷予志生：“溶湯性状の改善による低膨張鋳鉄の高品質化” (岐阜県機械材料研究所私信)
- 7) 旗手稔：平成 21 年度ものづくり実証等支援事業受託試験研究報告書 (2010)
- 8) 旗手稔：“低熱膨張性を有する鋳鉄の特性に関する総括的研究” 博士学位論文, p52, 近畿大学 (1995)
- 9) 渡辺ほか：“鋳鋼の生産技術”素形材センター (1996), p.237
- 10) 渡辺ほか：“鋳鋼の生産技術”素形材センター (1996), p.505