

機能性鋳鉄材料の高付加価値化

永井 寛* 井上裕之* 地形祐司*
榎本新一** 今野岳史** 大澤嘉昭*** 高森 晋***

Research on the Development for Heightening of Functionally Improved Cast Iron

NAGAI Yutaka* , INOUE Hiroyuki* , JIGATA Yuji* ,
ENOMOTO Shinichi** , KONNO Takeshi** , OSAWA Yoshiaki*** , TAKAMORI Susumu***

抄録

精密加工機や光学機器の高精度化に必要な鋳鉄部材の材料特性は、優れた熱膨張率と機械的強度である。これらの特性を具備する鋳鉄材料の開発を目的に、熱膨張率及び機械的性質と化学組成との関係を検討した。対象材料はオーステナイト系低熱膨張鋳鉄とし、通常材と低 Si 組成材料の機械的性質及び N、Mn 添加の影響を検討した結果、従来材に比較して低 Si 組成材料の熱膨張特性と機械的性質の向上が見いだされた。また、N 添加により熱膨張特性に顕著な変化はなく、Mn 添加量増加により伸びの特性向上が認められた。

キーワード：低熱膨張鋳鉄，機械的性質、熱膨張率

1 はじめに

半導体製造装置やレーザ測定機器などの精密光学機器では、温度変化により使用部材の寸法に変動が生じると光軸にゆがみが発生して大きな問題となる。このため、これらの機器には、精度維持のために低熱膨張材料が用いられている。

低熱膨張鋳鉄はこのような材料の一つであり、熱膨張率が小さく、鋳造性、加工性に優れることから利用されている。しかし、近年、半導体の集積度の向上や加工の高性能化の要求の高まりにとともに、機器の高精度化、高速度化、小型化を進めるため、薄肉加工の可能な高強度の低熱膨張鋳鉄の開発が強く求められるようになってきた。

そこで、本研究では、県内鋳鉄鋳物工場で製造

されるオーステナイト系低熱膨張鋳鉄¹⁾を対象として、強度向上を目的に以下の検討を行った。

従来材の低熱膨張鋳鉄をベースに、C、Si 組成を調整した材料と強度向上^{2),3),4)}に効果があるとされる元素である N 及び Mn の添加量を変化させた材料の鋳造実験を行い、これらの熱膨張率との関係と機械的性質への影響について調べた。

2 実験方法

2.1 供試材の溶製と熱処理条件

実験に供したオーステナイト系熱膨張鋳鉄は周波数 3kHz、出力 100kW の 30kg 高周波誘導炉により溶製した。溶解材料には鋼材、電解ニッケル、コバルト、黒鉛（加炭材）、カルシウムシリコンを用いた。低熱膨張鋳鉄溶湯は所定の成分に調整した後、必要により窒素、マンガンの添加処理を行い、1600 に保持した後、接種処理を行って出湯した。供試材は CO₂ ガス砂型を用い、JIS

* 材料技術部

** (株)榎本鋳工所

*** (独)物質・材料研究機構

Y 形試験片 B 号の形状に複数個ずつ鑄込んだ。

鑄造した供試材はベース材料として通常のオーステナイト系低熱膨張鑄鉄と同等成分組成の材質（従来材）と、この組成に対して炭素、けい素及びコバルト添加量を低下させた材質（開発材）の二種類とした。以下、これら供試ベース材料のうち、従来材を記号 A で、開発材を記号 B で表す。

鑄造後の複数個の供試材は、二分の一は鑄放しのままで、残りの二分の一は熱処理を行った後に、加工して機械的性質及び線膨張係数の測定、ミクロ組織の観察に供した。供試材の熱処理条件を図 1 に示す。熱処理は電気炉（B4S-1Z10-17 ネムス(株)）を用いて大気雰囲気で行った。

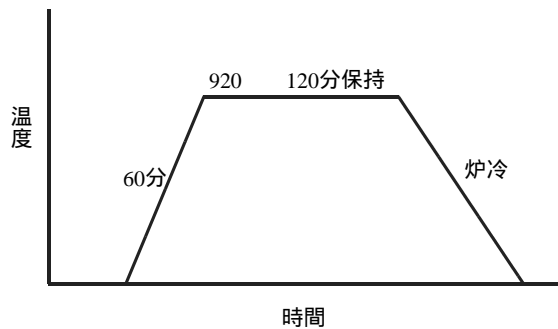


図 1 供試材の熱処理条件

2.2 供試材の特性評価

供試溶湯の化学成分は、窒素濃度以外は供試材鑄造時に採取した分析用チル試験片から発光分光分析法により組成分析して求めた。

窒素濃度の分析には、外径 5mm の石英管により炉中から供試溶湯を吸引・採取して急冷凝固させたピン試料を用いた。採取試料の窒素濃度は酸素窒素分析装置(TC436 LECO 社)を用い、熱伝導度法により分析した。

機械的性質は、供試材を引張試験片（JIS 4号試験片，平行部直径 14mm，平行部長さ 60mm）に加工し、引張試験機により引張速度 5mm/分で試験を行って引張強さ、耐力、伸びを調べた。硬さの測定は、ブリネル硬さ試験機により、圧子直径 10mm、試験力 29.42kN (=3000kgf)、保持時間 15 秒の条件で行った。

表 1 窒化フェロマンガンの化学成分 (mass%)

化学成分	Mn	C	Si	P	S	N
5%N	72.3	2.21	0.53	0.112	0.012	5.11

線膨張係数は、引張試験後の JIS 4号試験片端部から直径 5mm、長さ 12mm の円柱状に複数個の熱膨張率測定用試験片を切削加工し、熱機械分析装置（TMA8310 (株)リガク）により、昇温速度 10 /分、荷重 98mN で圧縮荷重法により 30 から 600 までの温度範囲で測定した。

供試材のミクロ組織は、硬さ測定部位近傍の組織を光学顕微鏡及び EPMA により観察した。

2.3 窒素とマンガンの添加

オーステナイト系低熱膨張鑄鉄への窒素添加剤には、一般に鑄鉄成分の元素を含まないと考えられるヘキサメチレンテトラミン（ $C_6H_{12}N_4$ ；以下ヘキサミン）を用いた。

ヘキサミンの添加には、アルミ箔で包んだヘキサミンを黒鉛系のホスフォライザーを用いて炉中に浸漬させ、温度 1600 に保持した溶湯と直接反応させる方法⁵⁾を用いた。ホスフォライザーは反応が沈静化するまで約 1 分間程度、炉中に保持した。ヘキサミンの添加量は溶湯に対する重量比で 0.05%、0.1%、0.2%、0.3% の四段階とした。

Mn の添加には、純度 99.88% の金属マンガンをを用いた。金属マンガンは 1600 に保持した溶湯中に直接装入し、その添加量は溶湯に対する重量比で 0.5%、1.0%、2.0%、3.0% の四段階とした。

また、表 1 に示す 5% N の窒化フェロマンガンをを用いて、窒素とマンガンの同時添加を試みた。窒化フェロマンガンの添加は、温度 1600 に保持した溶湯中への直接装入により行った。添加量は溶湯に対する重量比で 0.25%、0.5%、1.0%、2.0% の四段階とした。

3 結果と考察

3.1 供試材の特性

ベース材料として用いた従来材 A と開発材 B の化学成分の分析結果を表 2 に示し、鑄放し及び熱処理後の機械的性質と 300 までの熱膨張特性の測定結果をそれぞれ、図 2、図 3 に示した。

表2の化学成分分析結果から、開発材Bの方が従来材AよりもT.Cで0.13%、Siで0.89%、Coで1.8%低い値を示し、Mnは逆に0.16%高い値を示した。

図2から、供試材A、Bの機械的性質は、開発材Bの方が高い値を示し、熱処理後の値は、両供試材ともに鑄放しの値よりも低下していた。

図3から、熱膨張特性は低熱膨張材料の実用温度域である100℃強までは熱処理後の方が小さい値を示し、それ以上の温度域では鑄放し試料の方が小さい値をとることが分かった。100℃における値は従来材Aが $2.0 \times 10^{-6} / K$ 、開発材Bが $1.7 \times 10^{-6} / K$ 程度と、Bの方が優れた値を示した。

このように機械的特性、熱膨張特性ともに開発材BがAよりも優れた値を示したが、開発材Bの成分組成と材質との関係について、熱処理条件も含めて今後の詳細な検討が必要である。

3.2 窒素添加の影響

開発材Bへのヘキサミン添加による供試材中の

窒素濃度分析値の変化を表3に示した。表からヘキサミン添加量の増加により窒素濃度が上昇することが分かる。

なお、ヘキサミンの溶湯との反応状態の観察から、溶湯中でヘキサミンから分解した窒素の大部分は溶湯内から大気中へと浮上・拡散していると考えられる。

次に、この場合の開発材Bにおける鑄放し材の熱膨張特性の変化を図4に示した。図から、ヘキサミン添加による開発材B(鑄放し材)の熱膨張特性には顕著な変化は認められなかった。また、熱処理材の場合の熱膨張特性も、同様の傾向を示した。したがって、実験の窒素量範囲では、ヘキサミンの添加は熱膨張特性に顕著な変化を与えないと考えられる。

なお、この場合の機械的性質についても、顕著な変化は認められなかった。

3.3 マンガン添加の影響

開発材Bへの金属マンガンの添加による鑄放し

表2 ベース材(供試材)の化学成分(mass%, Nはppm)

ベース材	T.C.	Si	Mn	P	S	Ni	Co	N(ppm)
A(従来材)	0.57	1.18	0.13	0.010	0.008	30.0	5.1	42.9
B(開発材)	0.44	0.29	0.29	0.011	0.010	29.4	3.3	21.5

表3 ヘキサミン添加による窒素濃度の変化

	(ppm)		
	平均値	標準偏差	変動係数(%)
B	21.5	1.13	5.24
B + ヘキサミン(0.05%)	27.7	0.79	2.86
B + ヘキサミン(0.1%)	48.9	1.17	2.39
B + ヘキサミン(0.2%)	56.0	1.17	2.09
B + ヘキサミン(0.3%)	68.1	1.58	2.32

N: 7

変動係数:(標準偏差 / 平均値)×100

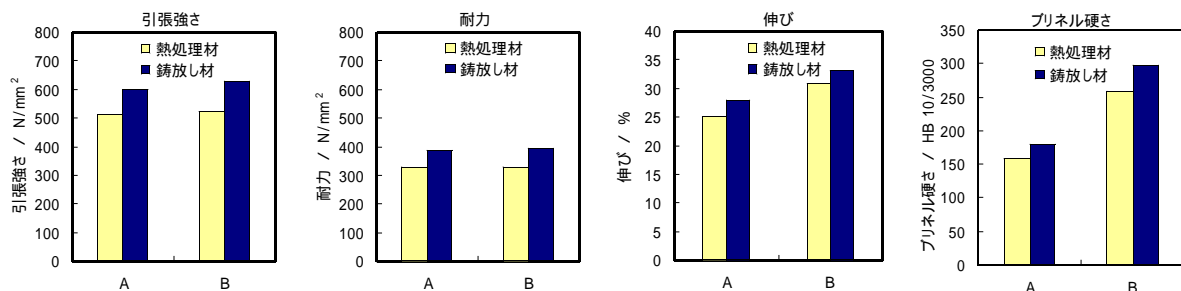


図2 供試材A、Bの機械的性質

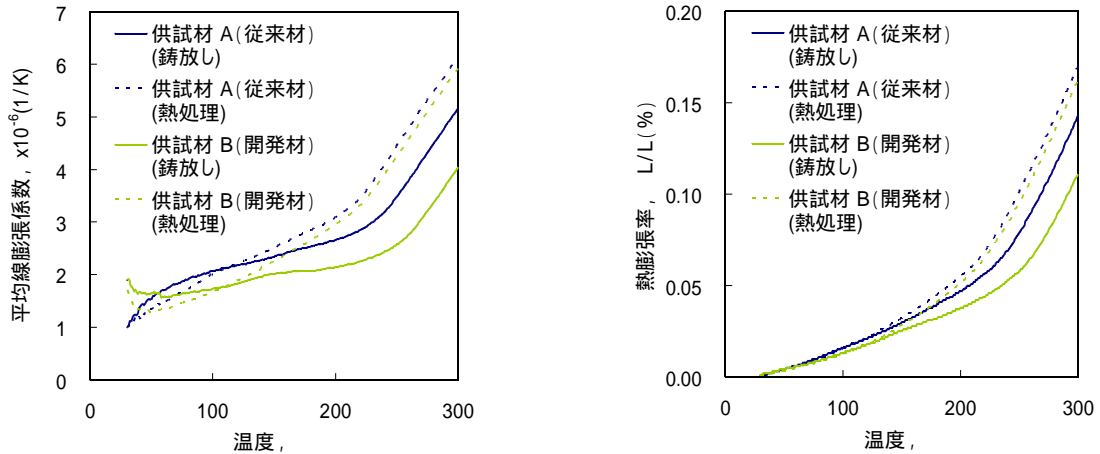


図3 供試材 A、B の熱膨張特性

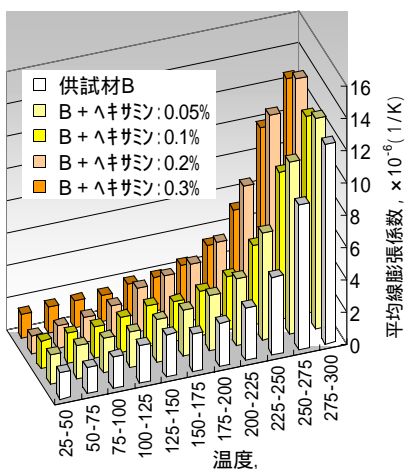


図4 供試材BへのAs添加による平均線膨張係数の変化(鑄放し材)

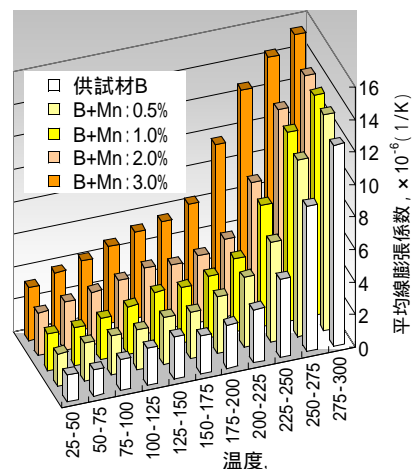


図5 供試材BへのMn添加による平均線膨張係数の変化(鑄放し材)

供試材の熱膨張特性の変化を図5に示した。Mn添加量が増加するに従い、平均線膨張係数の値が高くなる傾向にあることが分かる。熱処理後の供試材の場合にも同様の傾向を示した。したがって、この実験の範囲では、Mnは熱膨張率を増大させる傾向のある添加元素であることが分かった。

図6に開発材BのMn添加量と伸びとの関係を示した。Mn濃度が高くなると伸びの値が増大す

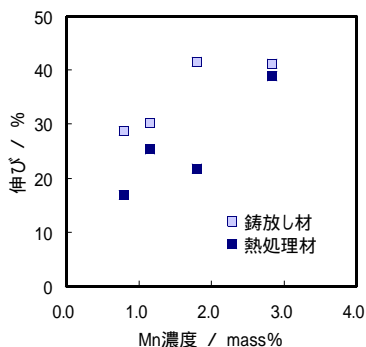


図6 供試材BにおけるMn添加量と伸びとの関係

る傾向にあることが分かる。なお、引張強さ及び耐力には、顕著な変化は認められなかった。

3.4 窒化フェロマンガンの影響

5% Nの窒化フェロマンガンを従来材Aに添加した場合、添加量2.0%では、鑄造試料中に多数の気泡状あるいは亀裂状の欠陥が発生して機械的性質の測定は困難であった。この場合を除いた引張強さ、耐力の測定結果をMn濃度で整理して図7に、伸びとMn濃度との関係を図8に示した。

図7、図8から、従来材AではMn濃度の増加により、引張強さ、耐力はやや低下する傾向を示した。また、伸びの値は、Mn濃度の増加によって逆に増大する傾向を示した。このようにMn濃度の増加により伸びの値が大きくなるのは、図6に示した開発材BにおけるMn添加量と伸びとの関係と同様の傾向である。

なお、鑄放し材と熱処理材の機械的性質を比較

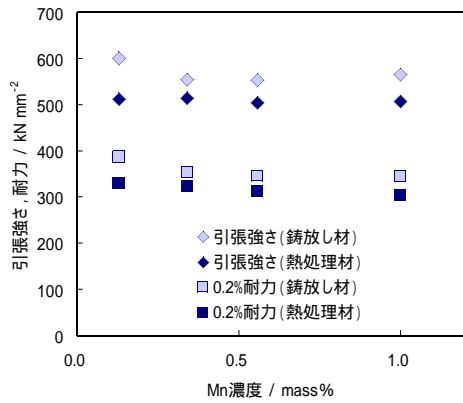


図7 供試材AにおけるMn濃度と機械的性質

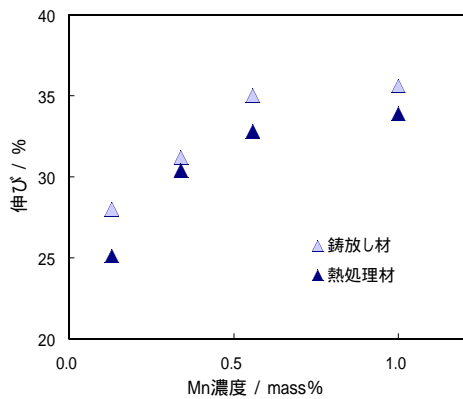


図8 供試材AにおけるMn濃度と伸びとの関係

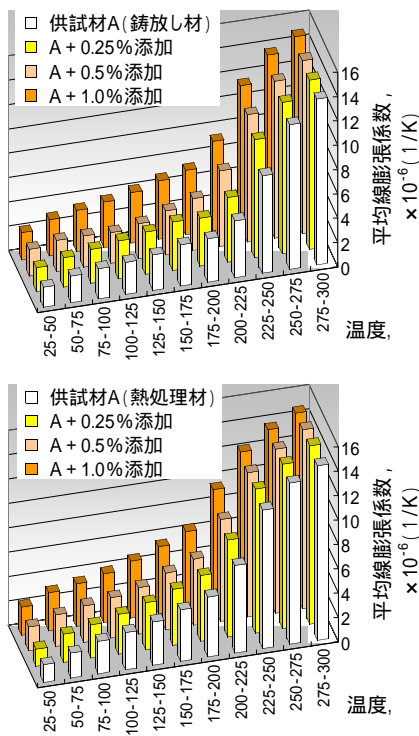


図9 供試材Aへの5%N窒化フェロマンガンの添加による熱膨張特性の変化(上:鑄放し材,下:熱処理材)

すると、引張強さ、耐力、伸びともに鑄放し材の方が熱処理材よりも優れた結果を示した。

従来材 A に 5% N 窒化フェロマンガンを添加した場合の熱膨張特性の変化を図 9 に示した。添加量の増加に従い、熱膨張率は高くなる傾向を示したが、前節 3.3 の結果と同様に、Mn 濃度の増加が熱膨張率の増大に影響していると考えられる。この場合の熱膨張率は、低熱膨張材料として適用可能な範囲内にある。このため、従来材よりも加工変形能の高い低熱膨張材料としての適用性など、本材質の実用性について詳細に検討する必要があると考えられる。

4 まとめ

本研究により、以下のことが分かった。

- (1) 従来材の 0.57%C-1.18%Si 低熱膨張鑄鉄に比較して、熱膨張特性及び機械的性質が向上した低熱膨張鑄鉄 (0.44%C-0.29%Si) が得られた。
- (2) 0.57%C-1.18%Si 低熱膨張鑄鉄及び 0.44%C-0.29%Si 低熱膨張鑄鉄への Mn 添加により伸びの値が向上した。
- (3) 0.57%C-1.18%Si 低熱膨張鑄鉄及び 0.44%C-0.29%Si 低熱膨張鑄鉄への窒素添加は、本実験の範囲で熱膨張率に顕著な変化を与えなかった。

参考文献

- 1) 榎本新一：低熱膨張鑄鉄について，鑄物，**61**，9 (1989)628
- 2) 鑄造工学会：鑄造工学便覧，丸善，(2002)，254
- 3) 永井寛，井上裕之，榎本新一，大澤嘉昭：埼玉県産業技術総合センター研究報告，**2**，(2004) 183
- 4) 半田卓雄：低熱膨張鑄鉄の特性について，素形材技術セミナー「設計者と鑄物屋のための鑄鉄特性の基礎技術と勘所」，(財)素形材センター，(2004)25
- 5) 笹原孝，山中昇，野口昌彦，大野輝夫，村松磐：埼玉県鑄物機械工業試験場年報，昭和 50 年度，(1976)57