

## 機能性低膨張鋳鉄材料の開発

永井 寛\* 井上裕之\* 榎本新一\*\* 大澤嘉昭\*\*\*

Development of Functionality Improved Low Thermal Expansion Cast Iron

NAGAI Yutaka\* , INOUE Hiroyuki\* , ENOMOTO Shinichi\*\* , OSAWA Yoshiaki\*\*\*

### 抄録

精密加工機や光学機器の部材に利用される低熱膨張鋳鉄材料の低熱膨張率と鋳造性を維持した上で、機械的強度の改善を図るための検討を行った。

対象とする低熱膨張鋳鉄の組織微細化による機械的強度の向上を目的として熱分析による超音波振動付加条件の設定を行った。求めた初晶温度及び共晶点温度から超音波振動付加を行った結果、膨張率は変化せず、硬さの向上が認められた。

キーワード：低熱膨張鋳鉄，機械的性質，超音波振動

### 1. はじめに

鋳鉄鋳物の製造は我が国産業の基礎となる素材産業を形成する最も中心的な基盤産業の一つである。鋳鉄鋳物製造業の振興を図るには、鋳物の特徴である複雑形状成形の容易性を活用し、自動化・省力化による生産性向上を図り、高付加価値化及び信頼性の向上によって鋳物製品としての競争力を高めることが重要である。

とりわけ多品種少量の鋳造品製造比率が高い本県の鋳鉄鋳物製造業では、高付加価値化と信頼性の向上による競争力向上の必要性が高い。

鋳造品への新たな機能性付与は、高付加価値化に直結し、製品競争力を向上させることになる。低熱膨張鋳鉄はこのような機能性を有する鋳造品の一つである。熱膨張率が小さく、振動減衰能が高く、鋳造性に優れる利点があるため、精密加工機や半導体製造用光学機器の部材などとして利用

されている。しかし、機械的強度や耐摩耗性等が他の鋳鉄材に比較して劣るため、これらの特性の改善が求められてきた。さらに、近年の高精度・高速・微細加工ニーズの高まりから、より薄肉化の可能な高強度、高硬度の機能性の高い低熱膨張鋳鉄材料の開発が求められている。

本研究では、県内鋳鉄鋳物工場で製造される低熱膨張鋳鉄を対象に、その強度・硬度の改善を目的として以下の研究を行った。

一般に金属材料の強度は結晶粒径の $1/2$ 乗に反比例して上昇することが Hall-Petch の法則<sup>1)</sup>として知られている。このため、材料の強度改善を結晶粒径の微細化により達成することを検討した。鉄系鋳造材料の結晶粒微細化技術としては、溶湯凝固時の冷却制御技術や振動(電磁的あるいは機械的)付加による方法が研究されている。本研究では、振動付加技術の一つであり、材料のリサイクル性に優れた組織微細化プロセスとされ、アルミ合金鋳造品の結晶微細化に実績のある超音波振動凝固<sup>2), 3)</sup>を適用し、二種類の低熱膨張鋳鉄を対象にその効果を検討した。

\* 材料技術部

\*\* (株)榎本鋳工所

\*\*\* (独)物質・材料研究機構

2. 実験方法

超音波振動凝固は超音波振動を直接熔融金属に付加するプロセスであるため、対象金属種により振動付加条件の設定が異なる。本研究では、対象とする材質を球状黒鉛鋳鉄系の低熱膨張鋳鉄である CD-5及び比較的高強度の低熱膨張鋳鉄である CN-5とした。

CD-5及び CN-5の代表的な化学成分を表1に、機械的特性を表2に示す。

表1 対象材質の化学成分 (%)

材質	T.C.	Si	Ni	Co	Mg
CD-5	2.1	2.5	31.0	5.0	0.04
CN-5	1.0	1.0	31.0	15.0	-

表2 対象材質の機械的性質

	CD-5	CN-5
引張強さ MPa	> 400	> 550
耐力 MPa	> 220	> 350
伸び %	> 18	> 5
ブリネル硬さ HB	130 ~ 170	200 ~ 230
弾性係数 N/mm <sup>2</sup>	120000 ~ 130000	130000 ~ 140000

2.1 超音波付加の条件設定

低熱膨張鋳鉄 CD-5及び CN-5に超音波振動を付加するためには、熔融状態の CD-5及び CN-5への振動付加開始温度及び振動付加終了温度の決定が必要になる。このため、これら材質の溶湯の凝固・冷却過程を測温して熱分析を行い、初晶温度、共晶点温度を調査した。

CD-5及び CN-5の熱分析における温度測定用鑄型には、外径約43mm、内径32mm、深さ50mmの市販の CE メータ用カップを用いた。カップ中心部に取り付けられた CE メータ用熱電対を取り除き、カップ上面から25mmの鑄型側面位置に熱電対挿入用の穴を開けた。熱分析(温度測定)用の熱電対は線径0.3mmの Rタイプを用いた。外径2mmの一端封じ石英管に熱電対を挿入し、熱電対先端をカップの中心線上に配置し、カップ上

面からの距離が25mmとなるようにセットした。

CD-5及び CN-5の溶湯は、炉容量500kgの高周波誘導炉により CD-5及び CN-5用の地金材料をそれぞれ溶解した。熱分析試料は、それぞれの同一溶解チャージから3試料ずつ採取して測定に供した。溶解・過熱後に出湯して出湯直後の溶湯を温度測定用鑄型に採取し、温度が700に低下するまで0.1秒間隔で溶湯の凝固・冷却過程を測定した。熱電対を用いた低熱膨張鋳鉄材料の熱分析方法の概要を図1に示す。

測定後の温度データは、時間により、一回微分及び二回微分を行い、温度変化の変曲点から初晶開始温度、共晶開始温度、共晶停滞温度などを測定して、初晶温度と共晶点温度を求めた。

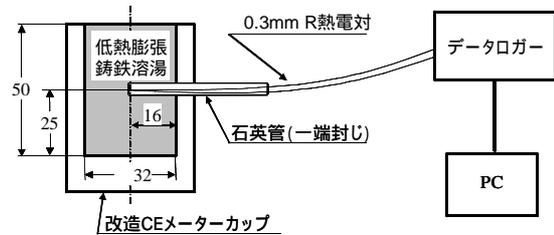


図1 熱分析用の温度測定方法の概要

2.2 超音波振動付加の影響

2.2.1 超音波振動凝固装置

低熱膨張鋳鉄の結晶粒微細化に用いた超音波振動凝固装置は物質・材料研究機構所有の装置である。図2に超音波振動凝固装置の概要を示す。

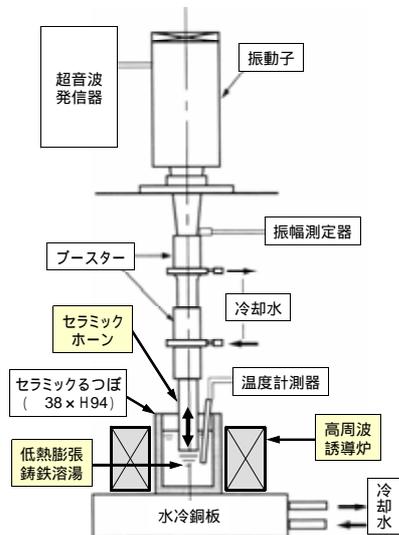


図2 超音波振動装置用の概要

本装置はるつぼの周囲が小型の高周波誘導炉で構成され、るつぼ内の金属の溶解と溶湯の温度制御を行うことができるとともに超音波振動を溶湯に直接付加することが可能となっている。

超音波発信器及び振動子で発生させた超音波振動はブースターで増幅され、その先端に取り付けたセラミック製(サイアロン)のホーンを通して伝ばされる。超音波振動の周波数及び出力は19 kHz、1200W、超音波の振動方向は、図2のセラミックホーンに付した矢印の方向である。ホーン寸法は直径20mm、長さ288mm、ホーンの超音波振動の振幅は約20 $\mu$ mである。超音波振動は、振動するホーンの先端部分を溶融金属中に直接浸漬することにより、金属溶湯中に伝ばされる。

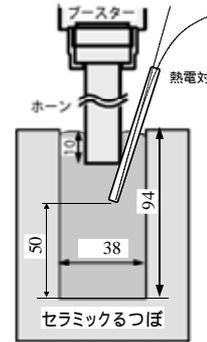


図3 ホーンとるつぼの位置関係

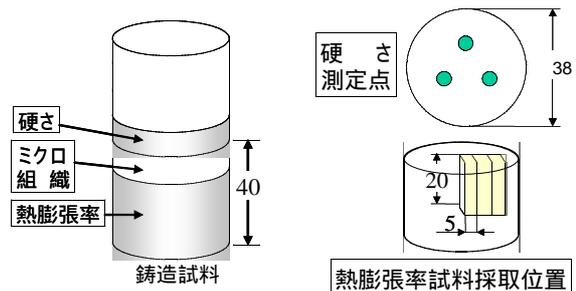


図4 試料の採取位置と硬さ測定点

## 2.2.2 低熱膨張鋳鉄の超音波振動凝固

低熱膨張鋳鉄 CD-5及び CN-5材料の超音波振動凝固には図2の超音波振動凝固装置を用いた。供試材料は熱分析実験に用いたのと同じの500kg 高周波誘導炉により地金を溶解し、有機自硬性鋳型を用いて鋳造した CD-5及び CN-5材料を直径34mm、長さ110mmの円柱状に機械加工した。これを内径38mm、高さ94mmの溶解用セラミックるつぼ内に素材として装入し、超音波振動凝固実験に供した。なお、超音波振動凝固装置による素材の溶解時には、るつぼ上面から約45mm 下方(るつぼ底面から50mm)の溶湯中に温度制御用熱電対(線径0.3mm)を挿入した。

試料は CD-5及び CN-5のそれぞれについて振動付加の有無により各二個ずつ作製した。図3にホーンとるつぼの位置関係を示す。振動の付加は予め室温で振動させたホーンをるつぼ内の溶湯の上部から10mmの位置に挿入して超音波振動を付加し、所定の温度(共晶点温度直上)に達したらホーンを溶湯から引き抜いた。

CD-5の場合、溶解温度は1400 $^{\circ}$ Cで行い、CN-5の場合は1500 $^{\circ}$ Cで行った。この温度でそれぞれ5分間保持した後、熱分析による解析から求めた温度(初晶温度から50~100 $^{\circ}$ C程度の過熱温度)で振動を付加し、るつぼ内でそのまま凝固させた。

一方、振動なしの試料は超音波振動を付加せず、比較用としてるつぼ内でそのまま凝固させた。

実験後の試料は底面から高さ40mmの位置で水平方向に二分し、図4に示した位置から超音波振動凝固評価のための試料を採取した。二分した試料の下側最上部から顕微鏡試料を採取し、光学顕微鏡により100倍及び500倍の倍率でミクロ組織を観察した。CD-5及び CN-5はオーステナイト系の鋳鉄であるため、エッチングには王水を用いた。二分した試料の上部からはミクロ組織観察部位に対応した面から硬さ測定試料を採取した。硬さは直径10mmのタングステン圧子により、試験力  $F=29.42\text{kN}$  (3000kgf) のブリネル硬さ試験により測定した。各試料における測定箇所は3箇所である。試料断面上の硬さ測定位置を図4に示す。

熱膨張率測定試料はミクロ組織観察部位下側のホーン直下に相当する試料中心部から試料外周方向に向かって3個、5 $\times$ 5 $\times$ 20mmのサイズに切り出した。試料両端面の平行度は研削加工により確保し、測定に供した。熱膨張率は毎分5 $^{\circ}$ Cの昇温速度で常温から400 $^{\circ}$ Cまで変化させて測定した。

これらの測定は両材質とも、素材、振動付加なし及び振動付加ありの3種の試料により行った。

3. 結果と考察

3.1 超音波振動付加の条件設定

CD-5及び CN-5の熱分析曲線とこれから得られた初晶、共晶温度等を図5、図6に示す。CD-5の場合、初晶温度は1245 程度、共晶点は1220 程度であることが分かった。CN-5の場合は出湯温度がやや低かったため、初晶温度が判別しにくいですが、温度変化の変曲点から、1395 程度であると推定できる。共晶点温度は1377~1380 程度である。この結果、低熱膨張鋳鉄への超音波振動付加温度は表3のとおりとした。

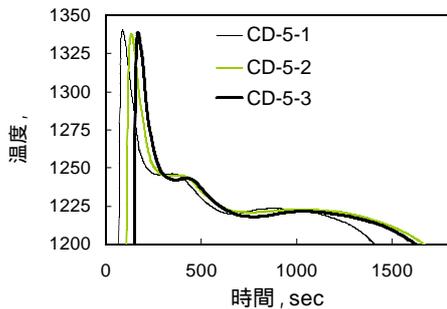
3.2 超音波振動付加の影響

表3の条件で超音波振動を付加した低熱膨張鋳鉄のミクロ組織を図7、図8に示し、硬さ測定結果を図9に示す。また、熱膨張率の測定結果を図10、図11に示す。CD-5のミクロ組織は、振動なしの場合、黒鉛形状は球状を呈し、振動付加では片状

に変化した。この原因は溶湯保持に時間を要したことによるフェーディングと推定できる。このため、球状黒鉛系低熱膨張鋳鉄に超音波振動を付加する場合、素材の再溶解時にはなく、地金からの溶解時での振動付加が、素材溶解時の黒鉛球状化剤の添加が必要になると考えられる。図9に示した硬さの値からも同様に、CD-5 では素材の再

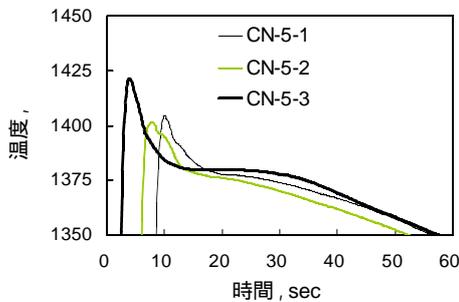
表3 超音波振動付加温度

	付加開始温度	付加終了温度
CD-5	1350	1230
CN-5	1450	1395



	CD-5-1	CD-5-2	CD-5-3
初晶温度(°C)	1246.2	1245.4	1243.4
共晶最低温度(°C)	1219.5	1220.6	1218.1
共晶最高温度(°C)	1223.4	1223.2	1221.4
共晶温度回復(°C)	3.9	2.6	3.3

図5 CD-5の熱分析結果



	CN-5-1	CN-5-2	CN-5-3
初晶温度(°C)	1393.3	1396.4	1397.1
共晶開始温度(°C)	-	1380.0	-
共晶停止温度(°C)	1377.6	1376.6	1380.0

図6 CN-5の熱分析結果

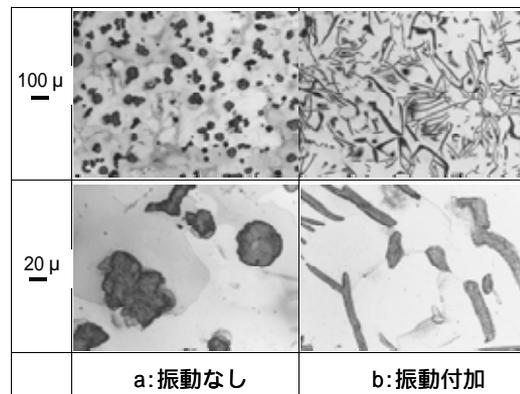


図7 CD-5低熱膨張鋳鉄のミクロ組織

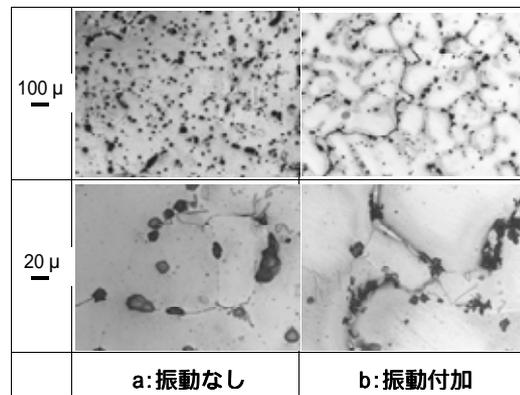


図8 CN-5低熱膨張鋳鉄のミクロ組織

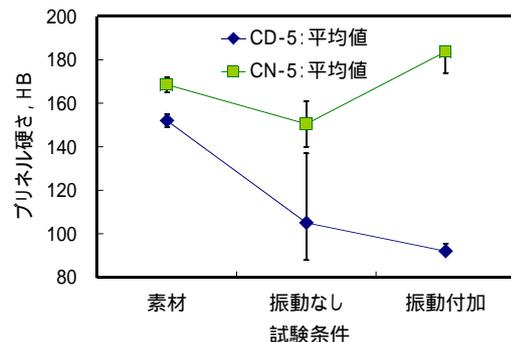


図9 硬さの変化 ( は変動幅を示す。)

溶解処理による硬さの低下が確認できる。

CN-5では、図8に示したマイクロ組織観察から、振動付加試料で結晶粒界に粒状組織がやや多くなる他、振動の有無による組織の変化は認められない。しかし、ブリネル硬さの測定から、CN-5の場合、図9に示した変動幅を考慮しても振動付加により、明らかに硬さが増大することが分かる。ブリネル硬さは一定領域の硬さを大域的に評価することができるため、マイクロ組織写真からは容易には判別できないが、結晶粒の微細化が生じている可能性が考えられる。この点については、今後、結晶粒径サイズを中心に検討する。

図10、図11には、それぞれ3試料の熱膨張率測定結果を示した。3試料は同一試料高さの隣接部位から採取したため、結晶粒径が大きく異なることはないと考えられる。CN-5試料の場合、振動付加1の試料は他の二試料よりも大きな熱膨張率を示した。しかし、他の二試料がほぼ同一の値を示したことから、この結果は振動付加に起因するものではなく、他の要因によるものと考えられる。これを除けば、CD-5、CN-5ともに振動付加の有無により、熱膨張率に大きな変動はなかった。

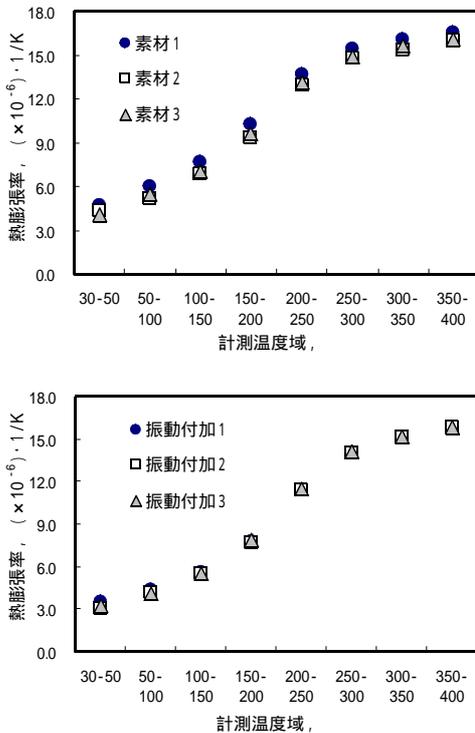


図10 CD-5の熱膨張率の変化 (上：素材，下：超音波振動付加)

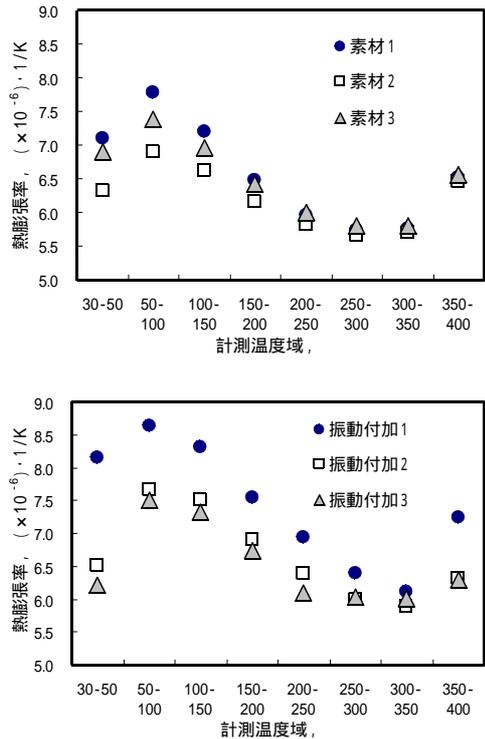


図11 CN-5の熱膨張率の変化 (上：素材，下：超音波振動付加)

#### 4. まとめ

低熱膨張鋳鉄(CD-5及び CN-5)への超音波振動の付加により、次のことが分かった。

- (1) 超音波振動の付加による熱膨張率の大きな変動は認められず、優れた熱膨張特性は維持された。
- (2) CN-5の場合、超音波振動の付加により、硬さの値が大きくなる傾向が認められた。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの御指導と御助言をいただきました埼玉大学工学部教授の加藤寛先生に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 第4版鉄鋼便覧(日本鉄鋼協会編), Vol1, 7・7・1
- 2) Y. Osawa, G. Aragane, S. Takamori, A. Sato and S. Ohashi : J. JFS 71(1999)98
- 3) Y. Osawa, S. Takamori, G. Aragane, O. Umezawa, A. Sato and S. Ohashi : J. JFS 72 (2000)187

