

球状黒鉛鑄鉄の引け性に及ぼす希土類元素の影響

近藤義大*, 藤川貴朗*

Effect of Rare Earth Elements on Shrinkage Characteristics of Spheroidal Graphite Cast Iron

Yoshihiro KONDO and Takao FUJIKAWA

A small amount of Rare earth elements (RE) added to spheroidal graphite cast iron to prevent the fading and neutralizing the impurity elements. However, there have been few reports for the optimum RE additive amount for cast iron with various thicknesses. Therefore, the effects of RE on Shrinkage Characteristics of FCD450 with several thickness were investigated. 0.007 %RE addition for 30mm-thick sample and 0.014 %RE addition for 15 mm-thick sample most suppressed shrinkage cavity and linear porosity, though for all samples without RE linear porosity were not restrained.

Key words: Spheroidal Graphite Cast Iron, Rare Earth Elements, Micro Structure, Shrinkage Cavity, Various Thicknesses

1. はじめに

鑄鉄は、凝固に伴う体積収縮を黒鉛の膨張で補うため、他の金属の鑄物に比べて凝固時の収縮が小さいのが特長である¹⁾。しかし、球状黒鉛鑄鉄は、凝固初期における鑄物外周の殻が弱く、黒鉛化膨張による張り気が強い²⁾ため、実際は引け欠陥が発生しやすい材料であると言われている。そのため、引け欠陥を発生させずに製造するには高い品質管理技術が必要である。

球状黒鉛鑄鉄製造の際には、鑄鉄溶湯に Mg を含む球状化剤を添加し、黒鉛を球状化させる処理が必要である。この球状化剤には、材質の安定化などを目的として、通常 1.0~2.5 mass%程度の希土類元素 (La, Ce など、以下、RE とする) が添加されており^{3,4)}、著者らは、材質の観点から、種々の肉厚の球状黒鉛鑄鉄製造に最適な RE 添加条件を明らかにしてきた⁵⁾。また、RE は引け性改善に効果があることが言われているが、鑄物製品の形状によって最適な添加量の詳細は明らかになっていないのが現実であ

る。そこで、本研究では、中物から小物製品を想定した引け試験片を用いた引け試験を行うことで、引け欠陥抑制に最適な RE 添加条件を明らかにすることを目的として実験した。

2. 実験方法

2. 1 溶解実験

実験に用いる鑄鉄の溶湯は、銑鉄、鋼板を原料として、50 kg 用高周波誘導炉にて FCD450 相当の組成で溶製した。溶製した溶湯は約 1520 °C まで昇温した後、球状化剤中の RE 含有量 (以下、RE 量とする) を 0 %, 0.25 %, 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 % に調整した球状化剤 (表 1) を用い、サンドイッチ

表 1 球状化剤成分, mass%

RE	Si	Mg	Ca	Al	Fe
0.00	47	4.7	2.2	0.2	残部
0.25	47	4.8	2.2	0.2	残部
0.49	47	4.8	2.2	0.3	残部
0.98	47	4.8	2.2	0.3	残部
1.47	47	4.9	2.2	0.3	残部
1.96	47	4.9	2.2	0.3	残部

法にて接種・球状化处理した。接種剤には 75 %Si, Ca, Ba, Al 系のものを使用し, 接種剤, 球状化剤はそれぞれ溶湯重量比で 0.40 %, 1.36 %用いた。注湯温度は約 1400 °C とし, ただちに成分分析用の Y ブロック B 号鑄型 (フェノールウレタン), 及び 2.2 に記す引け試験片鑄型に注湯した。

2. 2 引け試験片の形状及び試験法

鑄鉄に発生する引けは, 同じ溶湯でも製品形状の違いにより, 鑄物表面がへこむ外引けと, 製品内部に空隙 (ザク巣) が発生する内引けの二種類に分類される。本研究では, この二種類とも測定することを目的として, 図 1a)-c)に示す, 厚肉及び薄肉の引け試験片を用いて実験を行った。また, 鑄鉄の引けは, 製品と押し湯の関係に強く影響を受けるため,

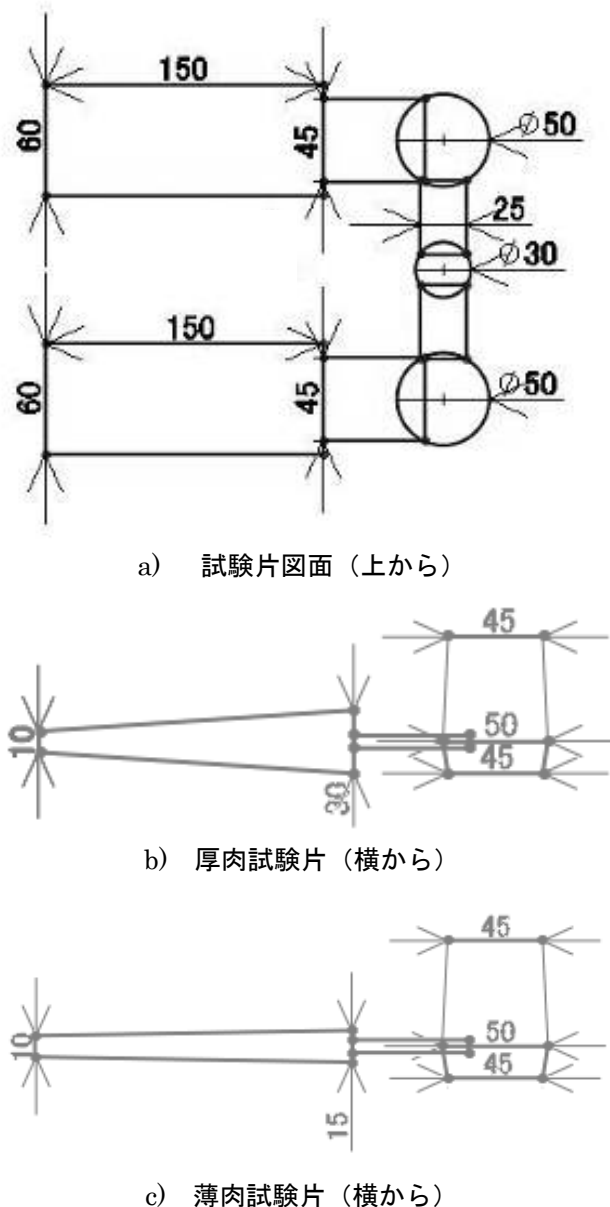


図 1 引け試験片図面 (単位はすべて mm)

前述の引け試験片の堰の形状を表 2 に記載するように 2 条件とした。

表 2 引け試験片の堰形状

単位 mm		
	堰の厚さ	堰の長さ
A	6	40
B	10	10

A は堰の厚さ 6 mm, 長さを 40 mm とし, 押し湯による溶湯補給効果を抑制することで強制的に引けを発生させる設計である。それに対して, B は堰の厚さを 10 mm, 長さを 10 mm とし, 押し湯の効果を促進することで, 計算上引けを発生させることなく鑄造できる設計とした。

引け試験片鑄型はフェノールウレタン樹脂による有機自硬性鑄型とした。鑄造した引け試験片について, A の堰形状で鑄造した引け試験片は, 内引けを可視的に測定するために, X 線透過測定を行った。X 線照射条件は, 厚肉, 薄肉試験片ともに管電圧 200 kVp, 管電流 5 mA とし, 照射時間は, 厚肉試験片は約 90 秒間, 薄肉試験片は約 30 秒間とした。また, 外引けを測定するために, 各試験片の堰から 40 mm 部分を横断するように, 5 mm 間隔で表面の相対的な凹凸を測定した。測定にはリニアゲージを用いた。B の堰形状で鑄造した引け試験片は, 発生する引けがごく微細なため, 切断, 研磨した後切断面を観察することで, 内引け巣の有無を判定した。また, この引け試験片鑄物の黒鉛粒数及び黒鉛粒径を測定し, 黒鉛粒数及び黒鉛粒径と引けに相関があるか検討した。

2. 3 成分分析方法

2.1 節で鑄造した Y ブロック B 号から切り出した JIS Z 2241 4 号試験片つかみ部から定量分析用試料を採取し, 成分分析を行った。C, S は赤外分光法で, Si は重量法で, それ以外の元素は ICP 発光分光分析法で分析した。

3. 結果と考察

3. 1 成分分析

2.3 節で成分分析した試験片の化学成分を表 3 に示す。球状化剤中の RE 量 0.25 % の試料のみ溶解時間が伸びてしまったため C がやや低いが, それ以外は概ねばらつきなく鑄造できた。炭素当量 (CE 値, $C_{mass\%} + 1/3 Si_{mass\%}$ とした) は 4.4 から 4.5 とな

No.	球状化剤中のRE量	RE添加量	CE値	C	Si	Mn	P	S	Mg	Al	La	Ce
①	0	0.000	4.42	3.55	2.60	0.38	0.019	0.009	0.042	0.015	<0.001	<0.001
②	0.25	0.003	4.35	3.51	2.51	0.38	0.018	0.009	0.038	0.015	0.001	0.001
③	0.5	0.007	4.40	3.58	2.47	0.33	0.017	0.009	0.035	0.015	0.002	0.003
④	1.0	0.014	4.41	3.53	2.64	0.38	0.020	0.008	0.038	0.016	0.004	0.007
⑤	1.5	0.020	4.47	3.58	2.66	0.39	0.020	0.008	0.041	0.017	0.006	0.011
⑥	2.0	0.027	4.47	3.59	2.64	0.40	0.022	0.008	0.037	0.019	0.007	0.013

り、一般的に引けが出にくいとされる過共晶組成であることが確認できた。

3. 2 X線透過測定

図 2 に、A の堰形状で铸造した引け試験片について、X線透過測定したフィルムを記す。黒ずんで見えるところはX線が透過し、内部にザク巣がある部分である。また、図 3 にザク巣が発生した領域の縦方向の長さを測定した結果を示す。測定の結果、厚肉試験片では、球状化剤中のRE量 0%、0.25%でザク巣発生長さが 45 mm 以上となったのに対し、同 0.5%以上で 30 mm 未満と、ザク巣発生が抑制された。薄肉試験片でも同様に、同 0%、0.25%でザク巣発生長さが 70 mm 以上と極めて長い範囲にザク巣が発生しているのに対し、同 0.5%以上で 50mm 前後、特に同 1.0%では 25 mm と、ザク巣抑制効果が確認された。

これらにより、鋳物への RE 添加量 0.003 %未満

で内引けを抑制できず、同 0.014 %で最も内引けを抑制する傾向があることが確認された。

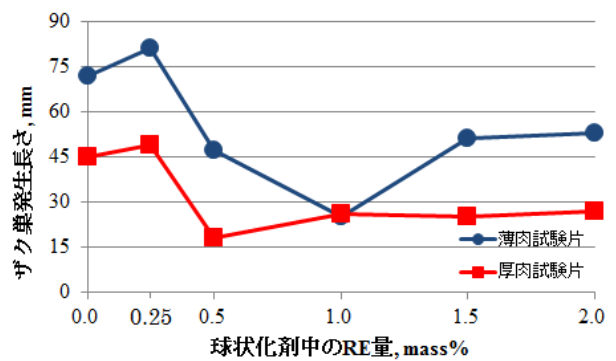


図 3 ザク巣発生長さ

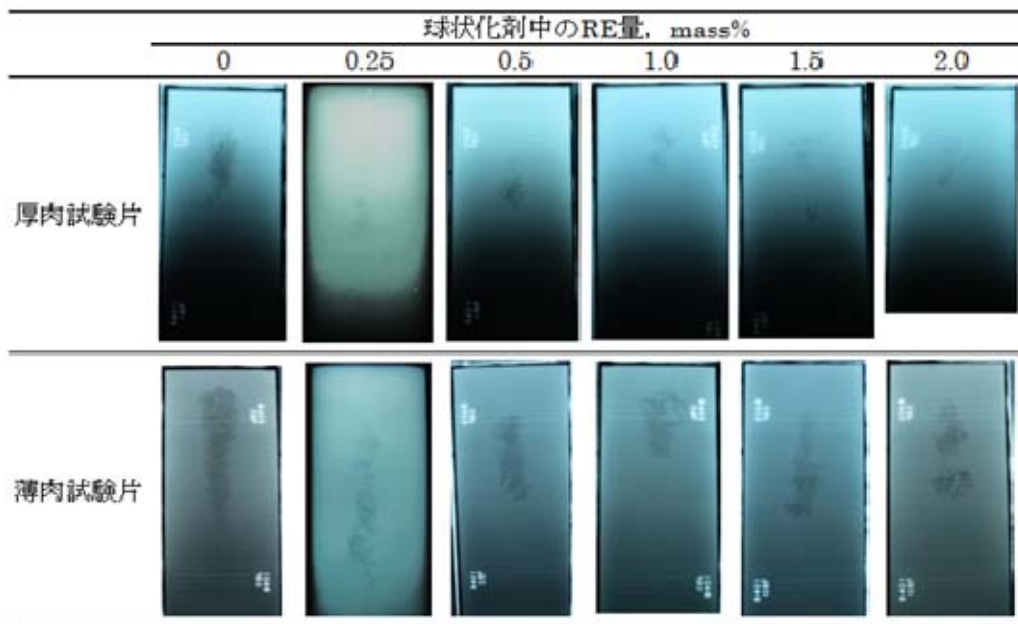


図 2 X線透過測定

20 mm

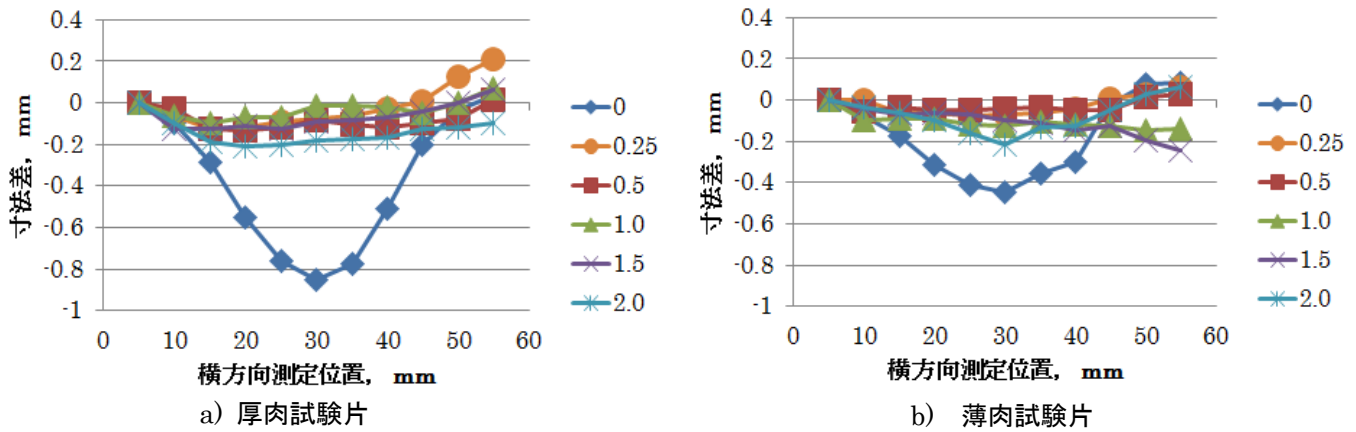


図4 外引け測定（凡例の数値は球状化剤中のRE量を示す）

3.3 外引け測定

図4に、Aの堰形状で铸造した引け試験片について、表面の相対的な凹凸を測定した結果を記す。数値は、試験片の端から5 mmの部分をもととして、へこんでいる部分を-、膨らんでいる部分を+として測定した。測定の結果、厚肉試験片、薄肉試験片ともに球状化剤中のRE量0%で大きく外引けし、同0.25%以上と、ごくわずかでもRE添加量が増えると外引けが抑制された。

これらにより、REの鋳物への添加が全くない条件だと、製品の厚みに関わらず外引けが発生しやすく、鋳物への添加量0.003%以上と、ごくわずかでも添加されると外引けを抑制する傾向が確認された。しかし、本実験で用いた堰形状Aの引け試験片は、2.2節で述べた通り、堰が長い上に薄く、押し湯からの溶湯補給が終わる前に堰が凝固している可能性があり、必ずしも一般的な鋳造方案の鋳鉄の凝固とは挙動が同じでないことに留意する必要がある。

3.4 切断検査

図5に、Bの堰形状で铸造した引け試験片について、切断・研磨面の観察をした結果を記す。これは押し湯の効果を促進し、理論上引けを発生させることなく鋳造できる設計とした引け試験片である。厚肉試験片、薄肉試験片ともにREを全く加えない条件では、10 mmほどの範囲にわたってザク巣が発生しているのが確認できた。また、球状化剤中のRE量1.5%、鋳物への添加量0.020%とした厚肉試験片においても、2 mmほどの範囲にわたってわずかにザク巣が確認された。それ以外の試験片についてザク巣は確認されなかった。

これらにより、押し湯、堰を適正に設計し、溶湯補給を充分効かせた方案においては、鋳物へのRE添加量0.003%以上とすることで、内引け巣の発生を抑制する傾向があるが、全く添加しないと内引け巣の発生を抑えられないことが確認された。実際の鋳物製品の鋳造においては、3.2節、3.3節の結果を踏まえ、鋳物へのRE添加量0.014%程度とすることで、内引け巣及び外引け抑制の効果を得られると

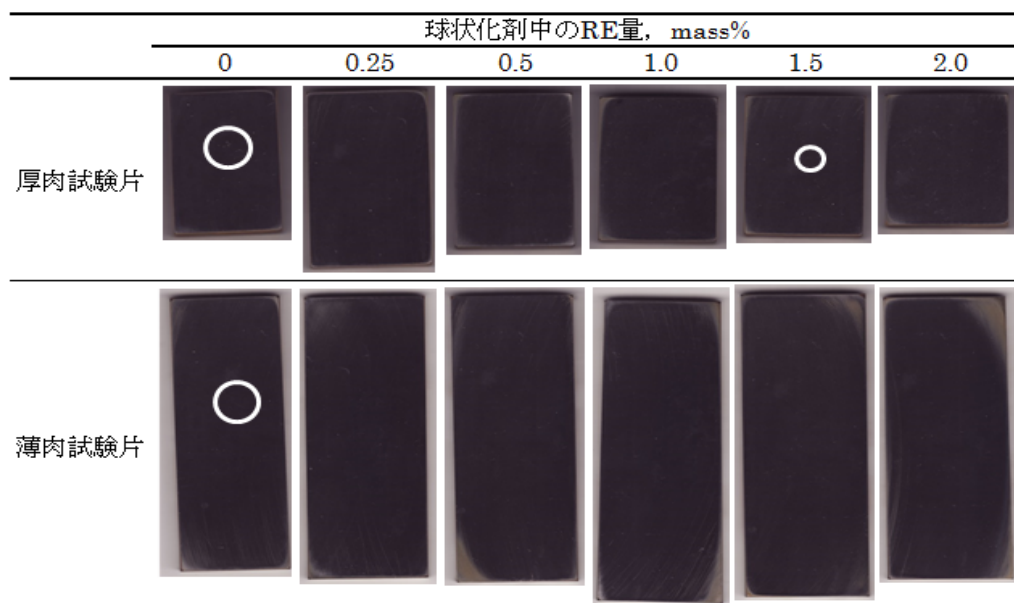
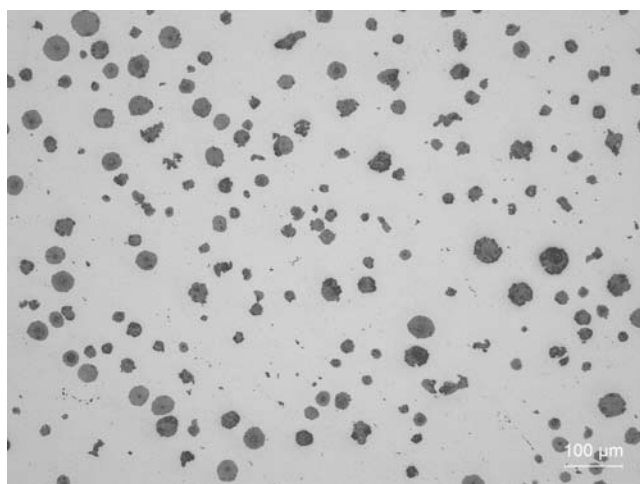


図5 切断検査

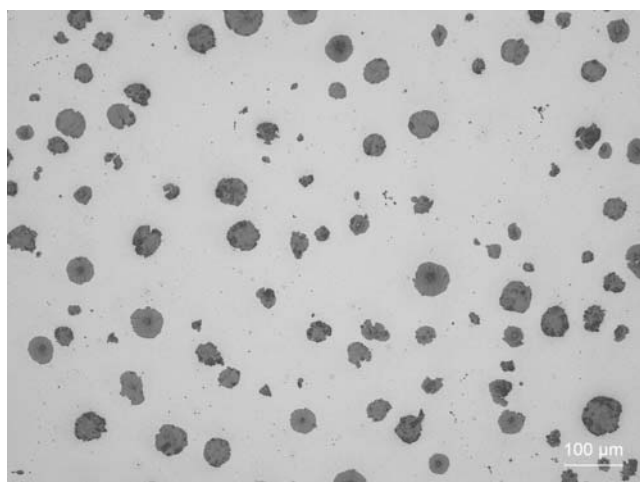
考えられる。

3. 5 金属組織観察

図 6 に 3.4 節で内引け巣の有無を測定した引け試験片の黒鉛粒数を、図 7a),b)に厚肉試験片の組織写真の一部を、図 8a),b)に各引け試験片の黒鉛粒径の分布を記す。ただし、5 μm 以上を黒鉛として測定し



a) RE 添加なし

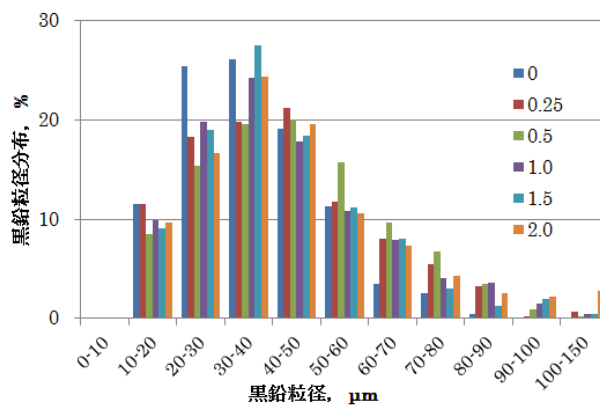


b) 球状化剤中の RE 量 0.5 %

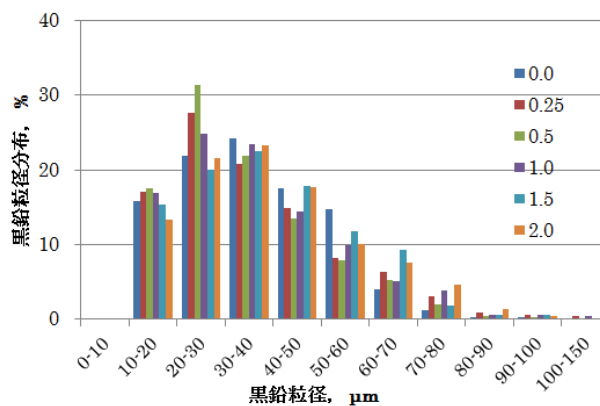
図 7 厚肉試験片組織写真

た。

測定の結果、厚肉試験片は RE 添加なしの条件で最も黒鉛粒数が多かった。また、厚肉試験片では RE 添加なしの条件において、比較的粒径の小さい 20~30 μm, 30~40 μm に偏って分布していた。薄肉試験片には、RE 添加量の違いによる顕著な差異は認められなかった。これらにより、厚肉試験片は RE 添加なしで内引け巣が発生しているにもかかわらず、球状黒鉛は多く晶出するという、一見矛盾しているように思える結果になった。この点について、黒鉛



a) 厚肉試験片



b) 薄肉試験片

図 8 引け試験片の黒鉛粒径分布 (凡例の数値は球状化剤中の RE 量を示す)

粒径の分布に偏りがあると内引けが発生しやすいという報告⁹⁾もあり、本実験の結果はこの説を支持する結果となった。すなわち、RE が全く含まれないと黒鉛粒径の分布が偏り、分布が一様になっている条件に比べて球状黒鉛の晶出、成長にかかる時間が短くなるため、黒鉛晶出による膨張の効果が薄れ、溶湯の凝固収縮に伴う内引け巣の発生を抑制できなくなった可能性が示唆される。

4. まとめ

引け性の観点から、球状黒鉛鑄鉄製造に最適な RE 添加条件を明らかにすることを目的として、溶湯補給が不十分な条件と、十分な条件について引け試験を行い、以下の結論を得た。

1. 溶湯補給が不十分な条件における引け試験の結果から、製品厚さが 30 mm 程度の中物鑄物であれば、鑄物への RE 添加量 0.007 % 以上で内引け巣 (ザク巣)、外引けともに抑制する。製品厚みが 15 mm 程度の小物鑄物であれば、同 0.014 % で最も内引け巣、

外引けともに抑制する。いずれの厚さの試験片においても、RE の添加が全くないと、内引け巣、外引けともに抑制できないことを確認した。

2.溶湯補給が十分な条件における引け試験の結果から、いずれの厚みの試験片においても、RE の添加が全くないと、内引け巣の発生を抑制できず、RE 添加量 0.003 %以上で一定の内引け巣抑制効果があることを確認した。

参考文献

- 1) 中村幸吉：“鑄鉄の生産技術”。素形材センター，p1-12 (1993)
- 2) 石橋守央ほか：“鑄鉄の生産技術”。素形材セン

- ター，p346-375 (1993)
- 3) 堀江皓：“各種元素の黒鉛球状化阻害作用”。鑄造工学，76，p119-124 (2004)
- 4) 佐藤高浩：“生砂量産ラインにおける低レアアース黒鉛球状化剤の適用事例”。レアアース代替・削減技術講習会(第2回)テキスト 2，p3-17 (2012)
- 5) 近藤義大ほか：“種々の肉厚の球状黒鉛鑄鉄の材質に及ぼす希土類元素の影響”。三重県工業研究所研究報告，40，p67-73 (2016)
- 6) 小綿利憲ほか：“低レアアース処理剤を用いた球状黒鉛鑄鉄の機械的性質とひけ性”。鑄造ジャーナル，13，p38-43 (2017)