

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560904

研究課題名(和文)自動車用部品の肉厚変動部のレアアースレス薄肉球状黒鉛鑄鉄の開発

研究課題名(英文)Development of rare earth-less thin walled spheroidal graphite cast iron of wall thickness variation portion of automotive parts

研究代表者

清水 一道 (SHIMIZU, Kazumichi)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60206191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：レアアースを低減させた薄肉における球状黒鉛鑄鉄の開発を目的として、鑄造条件や鑄造の際に使用されるレアアースが含有されている球状化剤に着目した。レアアース含有量を調整した球状化剤を使用し、薄肉での品質低下の原因となるチルの調査、レアアースを低減させた際に生じる鑄造欠陥が影響を及ぼす疲労強度の調査、実体製品から切り出した試験片による衝撃試験を行った。その結果、一般的な球状化剤に2.0%前後含有されているレアアースを0.3%まで低減させた場合でも、品質の低下を抑えることが可能であった。

研究成果の概要(英文)：The development of thin walled spheroidal graphite cast iron with reduced rare earth was aimed. We have focused on graphite spheroidizer contained rare earths be used during casting. Chill of research in thin walled, effect of casting defects on the fatigue strength, the impact test by test specimen was cut out from the entity production. Resulting in, even if the common rare earth to the graphite spheroidizer is contained 2.0% was reduced to 0.3%, it was possible to suppress deterioration in quality.

研究分野：工学

キーワード：レアアースレス 球状黒鉛鑄鉄 薄肉化

1. 研究開始当初の背景

鋳鉄の中でも球状黒鉛鋳鉄はその機械的性質から自動車部品に幅広く使用されている。現在、自動車の燃費向上を実現する技術の一つとして、自動変速機の多段化が進んでおり、今後もこの傾向は継続されるものと考えられている。しかし、自動変速機の大型化や重量増加は燃費向上に反するため、多段化の推進には相対的な小型化・軽量化を伴うことが重要である。軽量化を行うために、鋳鉄鋳物を薄肉化すると、薄くなる部分に急冷により炭素は黒鉛としてではなく、セメンタイトを形成して現れてくる。この現象はチル化と呼ばれる。セメンタイトは硬くて脆いため壊れやすく、チル化した材料を機械構造材料として用いるのは不適切である。そこで、チル組織を抑制するために、黒鉛の球状化率や黒鉛粒数を増加させることで、溶湯中の炭素を凝集させてセメンタイトの析出を抑える方法が考えられている。また、構造材料として用いるために、黒鉛を基地組織中に球状に晶出させて強度と靱性を持たせた球状黒鉛鋳鉄が利用されている。球状黒鉛鋳鉄を製造するためには、Ce(セリウム)やLa(ランタン)などレアアースと呼ばれる希少元素を含む球状化剤が添加されている。球状黒鉛鋳鉄を生産する上で、球状化剤の添加は欠かせないものとなっており、年間で約700~100ton程度使用されている。しかしながら、世界景気の回復に伴ってハイブリッドカーや家電製品の売上げが伸び、それに伴ってレアアースの需要も高まる一方、レアアースの埋蔵量、生産量ともに世界トップの中国が生産や輸出を制限している為、世界的にレアアースの需給が逼迫し国際価格が高騰している。レアアースの国内生産が少なく、海外からの輸入に頼っている日本において、球状化剤の高騰によるコスト増加や川下企業からのコスト削減の要求からくる鋳造業界への影響は大きいものである。現在に至っても、レアアースの安定供給問題が根本的に解決していないことから、鋳造業界としてレアアース代替・削減策の開発が急務となっている。

2. 研究の目的

球状黒鉛鋳鉄において、レアアースレスの薄肉化技術を実用化するためには、レアアース含有量を低減させることによって発生する鋳造欠陥などの課題を克服するとともに、自動車部品として求められる強度を維持しながら薄肉化と鋳造性を両立させることが必要である。そこで、本研究では、溶湯の化学成分の調整などの鋳造方案を確立するとともに、レアアースレス化による鋳造欠陥などの品質保持・良品条件の確立、レアアースレス薄肉化に伴う強度評価手法を確立、製品の品質確認システムの構築などを行い、レアアースレスとした際でも従来の製品同等の強度をもった自動車部品用薄肉球状黒鉛鋳鉄製造システムの確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 肉厚によるチル化への影響を調査するために図1に示す木型を使用して階段状試験片を製作した。寸法は幅100mm、長さ300mm、厚さを8、5、3mmの3段とし、薄肉側から注湯を行った。球状化剤は表1に示すものからレアアース含有量0%、0.3%、0.5%のものを使用し、各肉厚によるチルの発生について調査を行った。

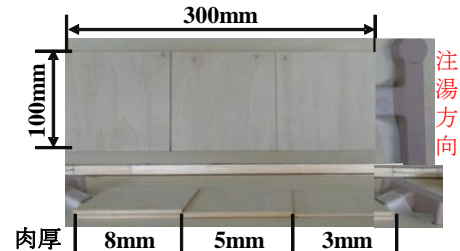


図1 階段状試験片の木型

表1 本研究において使用した球状化剤

| | Si | Mg | Ca | Al | RE |
|------|-------|------|------|------|------|
| 0% | 46.27 | 5.80 | 3.02 | 0.81 | - |
| 0.3% | 45.95 | 5.64 | 2.81 | 0.23 | 0.28 |
| 0.5% | 45.90 | 5.88 | 2.89 | 0.24 | 0.42 |
| 2.0% | 49.32 | 3.96 | 0.36 | 0.52 | 2.25 |

(2) 薄肉の球状黒鉛鋳鉄に発生する鋳造欠陥は機械構造用部品において重要な疲労強度に影響を及ぼすことが知られているため、表1に示した球状化剤を使用し、平面曲げ疲労試験を行った。供試材は図2に示す幅120mm、長さ40mm、厚さ5mmの薄肉用の木型を使用して製作した。サンドイッチ法による球状化処理を施した後、注湯温度1678K前後にて鋳型に注湯を行った。溶製した供試材の黒鉛性状と組織を確認後、平面曲げ疲労試験片に加工を行った。試験には図3に示す平面曲げ疲労試験機を使用した。試験条件は、繰返し速度20Hzの正弦波荷重、応力比を-1とし、試験環境は室温、大気中とした。試験片が破断、または繰返し数が 1×10^7 回に達した場合を試験停止条件とし、未破断であった試験片の負荷応力を疲労強度とした。

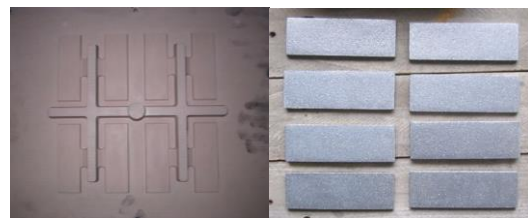
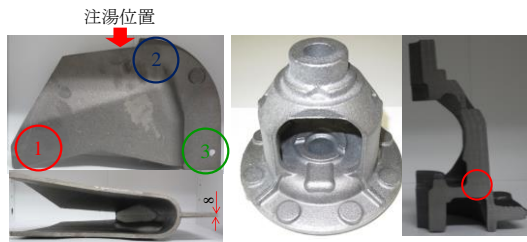


図2 使用した木型と製作した供試材



図3 平面曲げ疲労試験機

(3) レアアース含有量の異なる薄肉の実体製品を製作し、肉厚変動部などからシャルピー衝撃試験片を切り出し、靱性の評価を行った。図4に切り出しを行った農機具部品及びデフケースと各切り出し位置を示す。球状化剤は表2と表3に示すものを使用した。実体製品から衝撃試験片を切り出すにあたり、一般的に使用されている JIS4 号試験片の寸法では困難であったため、JIS4 号試験片を小型化したシャルピー試験片を使用した。衝撃試験には図5に示す小型試験片対応シャルピー衝撃試験機を使用した。



農機具部品 デフケース
図4 実体製品と各切り出し位置

表2 農機具部品に使用した球状化剤

| | Si | Mg | Ca | Al | RE |
|------|-------|------|------|------|------|
| 0% | 46.27 | 5.80 | 3.02 | 0.81 | - |
| 0.5% | 45.90 | 5.88 | 2.89 | 0.24 | 0.42 |
| 1.0% | 45.88 | 5.92 | 2.98 | 0.19 | 0.92 |
| 2.0% | 49.32 | 3.96 | 0.36 | 0.52 | 2.25 |

表3 デフケースに使用した球状化剤

| | Si | Mg | Ca | Al | RE |
|------|-------|------|------|------|------|
| 0% | 46.27 | 5.8 | 3.02 | 0.81 | - |
| 0.3% | 45.95 | 5.94 | 2.81 | 0.23 | 0.23 |
| 0.5% | 45.90 | 5.88 | 2.89 | 0.24 | 0.42 |
| 1.5% | 46.01 | 4.39 | 1.63 | - | 1.57 |



図5 小型シャルピー衝撃試験機

4. 研究成果

(1) 階段状試験片によって得られた各レアアース含有量の肉厚における組織を図6に示す。図6よりレアアース含有量0%, 0.3%, 0.5%の各肉厚においてチルの発生を抑えていることが確認された。更に、黒鉛の球状化率は80%以上、黒鉛粒数は300個/mm²以上となっており良好な数値を示していた。そのため、レアアースを低減させた場合でも品質の低下を抑制することが可能であった。

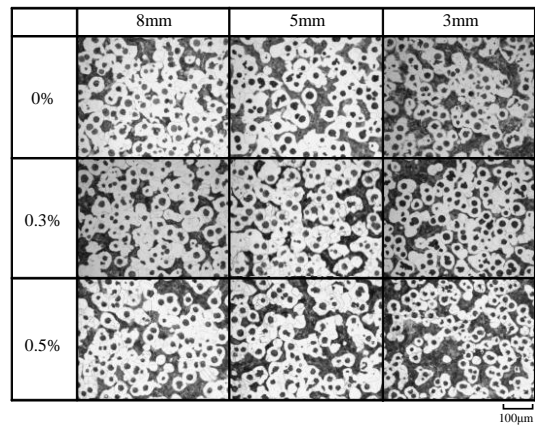


図6 各階段状試験片の組織

(2) 製作した供試材の組織写真を図7に示す。図7よりレアアース含有量によって組織、機械的性質に差はなく良好であった。平面曲げ疲労試験によって得られた結果について横軸を繰返し数、縦軸を試験片の負荷応力としたS-N線図を図8に示す。図8より、疲労強度はレアアース含有量2.0, 0.5, 0.3%では約307MPaであったのに対し、0%では293MPaと約8%疲労強度が低下した。その要因を調査するため破断した試験片の破面を観察した。破面に観察された最大寸法の铸造欠陥を図9に示す。铸造欠陥は、き裂の発生起点や進展速度に影響し破断に至る原因となる。そこで、欠陥の大きさを力学的に定量評価するために \sqrt{area} パラメータモデルを用いた。 \sqrt{area} パラメータモデルは铸造欠陥が内接する矩形範囲面積の平方根のことであり、これを用いることで形状の異なる铸造欠陥でも比較が可能になる。求めた \sqrt{area} の値を用いて、き裂先端における応力場の強さを表す応力拡大係数範囲 ΔK を以下の式にて算出した。

$$\Delta K = \alpha \Delta \sigma \sqrt{\pi \sqrt{area}}$$

α は定数であり、内部欠陥は $\alpha=0.5$ 、表面欠陥は $\alpha=0.65$ である。

ΔK_{th} は、き裂が伝播する最小の ΔK のことであり、以下の式にて算出した。

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (Hv + 120) (\sqrt{area})^{1/3}$$

Hvは各試験片のビッカース硬さを表す。

ΔK が ΔK_{th} を上回っている場合、その欠陥が破断する際の起点となりやすくなる。図9に示した铸造欠陥に \sqrt{area} を適応し、表4に ΔK 、 ΔK_{th} を算出した結果を示す。表4よりレアアース含有量0%の試験片では $\Delta K / \Delta K_{th}$ が1.44とレアアースを含有した球状化剤と比較して大きいことが疲労強度を低下させたと考えられる。レアアース含有量0.3%, 0.5%, 2.0%の球状化剤における $\Delta K / \Delta K_{th}$ の値は1.08~1.24となり、差は小さくなっていったことから、レアアース含有量は0.3%まで低減可能であると推察される。

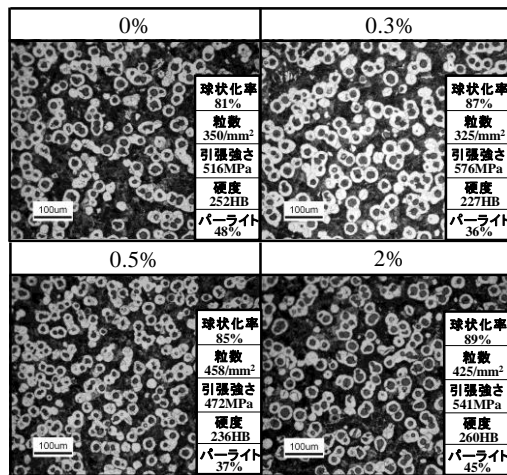


図7 各供試材の組織

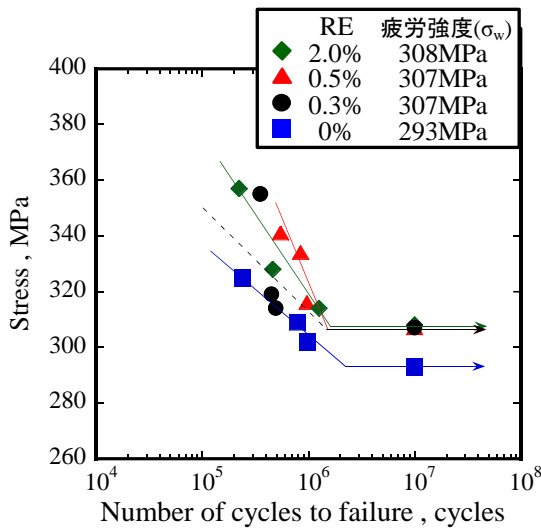


図8 実験結果のS-N線図

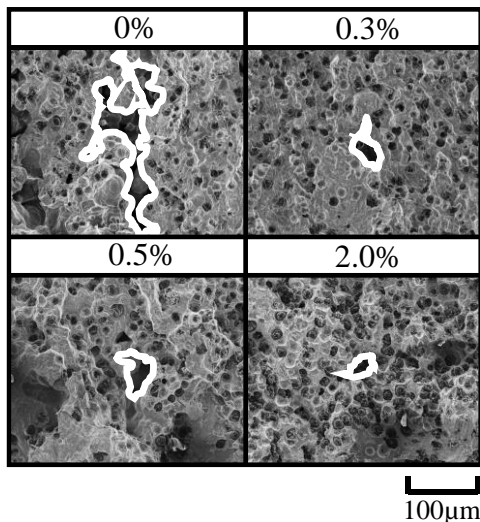


図9 破面に観察された最大寸法の铸造欠陥

表4 铸造欠陥の各パラメータ

| RE | 0% | 0.3% | 0.5% | 2% |
|---------------------------|------|------|------|------|
| Stress[MPa] | 302 | 314 | 316 | 314 |
| √area _{max} [μm] | 295 | 74 | 78 | 52 |
| ΔK _I [MPa√m] | 9.2 | 4.8 | 4.9 | 4.0 |
| ΔK _{th} [MPa√m] | 6.4 | 4.1 | 4.0 | 3.7 |
| ΔK/ΔK _{th} | 1.44 | 1.17 | 1.24 | 1.08 |

(3)① 農機具部品における各試験片の組織写真を図10に示す。図10より試験片の切り出し位置によって組織に変化が確認された。図11に衝撃試験によって得られた3本平均の吸収エネルギーを示す。図11より切り出し箇所による差は生じているが、これは組織のパーライト率の差に起因するものと考えられる。各レアアース含有量で比較すると差が約0.1Jと小さくなっていった。

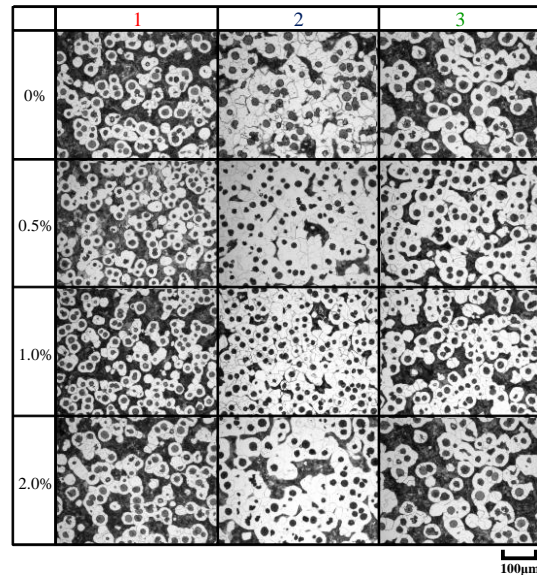


図10 農機具部品の各組織写真

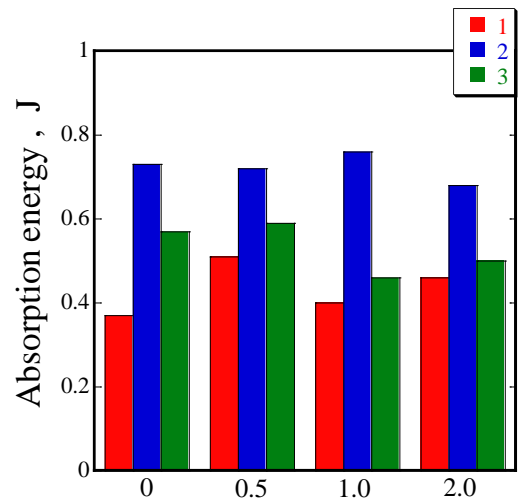


図11 各レアアース含有量における衝撃値

② デフケースより切り出した試験片の各組織を図12に示す。図12より各試験片のパーライト率には差が生じていたが、黒鉛の球状化率および粒数は良好な性質を示した。図13に衝撃試験によって得られた3本平均の吸収エネルギーを示す。図13よりレアアース含有量0, 0.3, 0.5%において差は約0.1Jであり、レアアース含有量による差は生じていなかったが、0.3, 0.5%と1.5%では約0.2Jの差が生じた。しかしながら、JIS4号試験片において衝撃試験を行った場合、これは0.1J~0.2J程度の差と同等であると考えられ、レアアース含有量による影響は小さい。

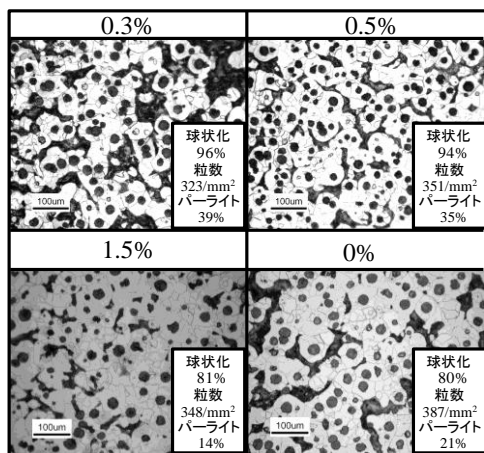


図 12 デフケースの各組織写真

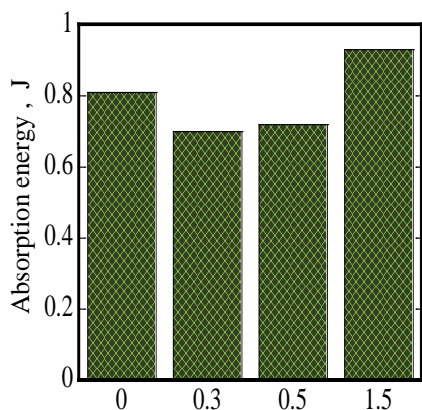


図 13 各レアアース含有量における衝撃値

(4) 本研究は、自動車用部品に用いられる薄肉球状黒鉛鋳鉄をレアアースレス化することを目的とし階段状試験片によるチル化試験、平面曲げ疲労試験、実体製品による小型シャルピー衝撃試験を行うことで、球状化剤のレアアース含有量を 0.3%まで低減させた場合でも品質の低下を抑制可能であるという知見を得た。

<引用文献>

村上敬宜：金属疲労微小欠陥と介在物の影響（養賢堂）（1993）17,58

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① 船曳 崇史, 清水 一道, 河合 秀樹, 戸舘 海灯, 白井 雅人, 薄肉球状黒鉛鋳鉄の疲労強度におよぼすレアアース含有量の影響, 鑄造工学, 査読有, 第 87 巻 第 3 号, 2015, 175-180
- ② 清水 一道, 関根 崇博, 鳥居 明秀, 高松 吉金, レアアースレス合金を接種した球状黒鉛鋳鉄の衝撃特性, 鑄造工学, 査読有, 第 84 巻第 12 号, 2012, 682-686

〔学会発表〕（計 8 件）

- ① T.Funabiki, K.Shimizu, S.Kiguchi, M.Yamamoto, Effect of Rare Earth on Fatigue Strength of Spheroidal Graphite Cast Iron, 12th Asian Foundry Congress, 2014.12.10, Taipei(Taiwan)
- ② 船曳 崇史, 清水 一道, 戸舘 海灯, 白井 雅人, 三浦 孝之, 薄肉球状黒鉛鋳鉄における鑄造欠陥の破壊力学的評価, 日本鑄造工学会第 165 回全国講演大会, 2014.10.18, 北九州国際会議場（福岡県北九州市）
- ③ 戸舘 海灯, 清水 一道, 船曳 崇史, 白井 雅人, 三浦 孝之, レアアース含有量の異なる薄肉球状黒鉛鋳鉄の疲労強度, 日本鑄造工学会第 165 回全国講演大会, 2014.10.18, 北九州国際会議場（福岡県北九州市）
- ④ T.Funabiki, K.Shimizu, Y.Nakajo, S.Kiguchi, M.Yamamoto, Fatigue characteristic of spheroidal graphite cast iron with alternate material of rare earth, The 71th World Foundry Congress, 2014.5.21, Bilbao(Spain)
- ⑤ 戸舘 海灯, 清水 一道, 船曳 崇史, 白井 雅人, 三浦 孝之, 薄肉球状黒鉛鋳鉄の疲労強度におよぼすレアアース含有量の影響, 日本鑄造工学会平成 26 年度北海道支部大会, 2014.4.18, 北海道総合研究プラザ（北海道札幌市）
- ⑥ 船曳 崇史, 清水 一道, 白井 雅人, レアアースレス球状黒鉛鋳鉄の衝撃特性, 日本鑄造工学会第 163 回全国講演大会, 2013.10.27, 高岡商工ビル（富山県高岡市）
- ⑦ 船曳 崇史, 清水 一道, 山本 将大, レアアースレス球状黒鉛鋳鉄の疲労強度, 日本鑄造工学会第 162 回全国講演大会, 2013.5.25, 山梨大学（山梨県甲府市）
- ⑧ 清水 一道, 関根 崇博, 鳥居 明秀, 高松 吉金, REless 合金接種した球状黒鉛鋳鉄の衝撃特性評価, 日本鑄造工学会第 160 回全国講演大会, 2012.5.28, 名古屋市中小企業振興会館（愛知県名古屋市）

6. 研究組織

(1)研究代表者

清水 一道(SHIMIZU, Kazumichi)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：60206191