

平成 23～25 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

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  
良品条件の確立および品質確認システムの構築

研究開発成果等報告書

平成 26 年 3 月

委 託 者：経済産業省北海道経済産業局

事業管理者：株式会社北海道二十一世紀総合研究所

## 目次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
(1) 実施内容の細目	1
(2) 委託期間	4
1-2 研究体制	5
(1) 研究組織及び管理体制	5
(2) 管理員及び研究員	5
(3) 研究支援体制	6
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 研究開発の内容	9
1. 球状化処理方法の変更による高強度球状黒鉛鋳鉄製造技術の開発	9
(1) 球状化剤の選定	9
(2) 薄肉供試材の製造	10
2. レアアースレス球状黒鉛鋳鉄の薄肉化技術の開発	11
(1) レアアースレス球状黒鉛鋳鉄の薄肉化技術の開発（平成24年度）	11
(2) レアアースレス球状黒鉛鋳鉄の薄肉化技術の開発（平成25年度）	14
3. 内部欠陥制御技術の開発	20
(1) 開発概要	20
(2) 農機具部品による小型シャルピー試験（岩見沢鋳物による実体試験）	20
(3) デフケースによる小型シャルピー試験（佐藤鋳工による実体試験）	22
4. 品質確認システムの確立	23
5. 事業化への検討	24
6. 総括	24

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### (1) 実施内容の細目

##### 1) 研究の目的

自動車の燃費向上を実現する技術の一つとして、自動変速機が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、自動変速機の大形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、 $\text{Fe}_3\text{C}$ (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。そのため、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を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) 研究の概要

レアアースレスによる薄肉化技術を実用化するためには、それ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、部品の余肉を最小化する

シミュレーション、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した。

事業名：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鋳鉄の良品条件の確立  
および品質確認システムの構築

従来技術

①レアアース球状黒鉛鋳鉄の製造



接種剤(レアアース)

年間使用量  
約700~1,000ton  
需給が逼迫し  
国際価格が高騰

新技術

~~接種剤(レアアース)~~

①接種剤

- レアアース削減
- 代替材の開発

②原材料・溶湯

- 成分調整
- 温度管理
- 不純物元素の抑制
- 黒鉛粒数増加

従来の強度維持  
黒鉛粒数1,000個/mm<sup>2</sup>

②REレス球状黒鉛鋳鉄製品の薄肉化



肉厚変動部

- 川下企業(自動車産業)
- 低燃費化
  - 低コスト化
  - = 鋳鉄の小型化・軽量化

自動車部品  
20%軽量化  
肉厚2.0mm



- 歩留まり向上(無欠陥鋳物製造)
- チル化(セメント化)の抑制
- 肉厚変動部の湯流れ性
- 冷却速度制御技術の開発

③良品条件・品質確認システムの構築(設計から検査まで)



設計



シミュレーション



RPIによる木型試作



不純物元素の除去



REレス薄肉化



X線解析など検査

管理法人：(株)北海道二十一世紀総合研究所 再委託先：佐藤鋳工(株)、室蘭工業大学

### 3) 実施内容

#### ①球状化処理方法変更による球状黒鉛鑄鉄製造技術の開発

(佐藤鑄工㈱、岩見沢鑄物㈱、国立大学法人室蘭工業大学)

従来、球状化剤として添加してきた Mg や、黒鉛粒数を増加させるために添加されてきた希土類元素（レアアース）の低減およびレス化を行った。レアアース代替材（接種剤）の選定、摂取方法の検討、化学成分中の硫黄（S）量を低下させ、マンガン（Mn）量を増加させるなどの配合の検討を実施。数十種以上におよぶ配合調整を導入した小型真空高周波熔解炉を用いて、少量多種の材料製造を行った。

#### ②レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の薄肉化技術の開発

(佐藤鑄工㈱、岩見沢鑄物㈱、国立大学法人室蘭工業大学)

平成 23 年度は、プロジェクトメンバー各社がそれぞれ別材料を用いた階段状試験片を作成し評価した結果、肉厚 3 mm の部分でチル化したケースとチル化しないケースがあった。

平成 24 年度は球状化処理方法変更を行ない、薄肉試験片（階段状試験片）および実体製造を行った。各社製造した階段状試験片において薄肉部でのチル化が確認され、また実体において肉厚変動部にヒケ巣の発生も確認された。

平成 25 年度は、3mm 以下の薄肉部でチル発生を抑制するための鑄造方案の検討、原材料となるスクラップの品質条件変更によるチルの発生抑制などの研究開発を行った。

具体的には、階段状試験片木型を用い鑄造方案（注湯方向、上がりの有無）など、また、原材料となるスクラップから銅およびマンガン含有率の高いものを排除し、パーライト率の低下を図るなど考慮し、得られた試験片の球状化率、黒鉛粒数、硬さなど評価を行った。階段状試験片のほか、Yブロックも製造し、引張り試験片、平面曲げ試験片、シャルピー衝撃試験片の作成を行ない、レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の薄肉化を図った。

#### ③内部欠陥制御技術の開発

(佐藤鑄工㈱、岩見沢鑄物㈱、国立大学法人室蘭工業大学)

平成 24 年度では、レアアース材料とし試験的に製造した実体において、肉厚変動部でのヒケ巣が確認された。

平成 25 年度では、内部ヒケ巣の発生を抑制するために、凝固シミュレーションを利用した解析を進め、結果を元にした実体の製造試験を行った。また、鑄物業者毎に使用する鋼材スクラップに含まれる不純物元素の解析などを進め、原料の調整から、製品の検査まで一連化した製造現場で求められている欠陥制御技術の開発を行うことで、製品の歩留り率の向上を目指した。

#### ④品質確認システムの確立

(佐藤鋳工㈱、岩見沢鋳物㈱、国立大学法人室蘭工業大学)

鋳鉄溶湯のサンプル採集による凝固パターン測定を行ない、その結果により実体試験等を行わなくてもある程度、溶湯の性状を確認することを目的とした。

測定サンプル数の増加、実体試験を繰返し、予測データの精度向上を行った。また、実際の現場での解析手法、活用方法を調査し、本品質確認システムが使用可能であるかの評価を行った。

#### ⑤事業化への検討

(佐藤鋳工㈱、岩見沢鋳物㈱、国立大学法人室蘭工業大学)

本事業において開発されたレアアースレスおよび低レアアース化球状黒鉛鋳鉄の薄肉化技術の活用方法について、特許取得、技術移転などの事業化へ向けての検討を行った。また、品質確認システムの活用方法、レアアースレス球状化剤・接種剤の販売などの企業調査を行ない、事業化の可能性を検討した。

#### ⑥プロジェクトの管理運営

(株式会社北海道二十一世紀総合研究所)

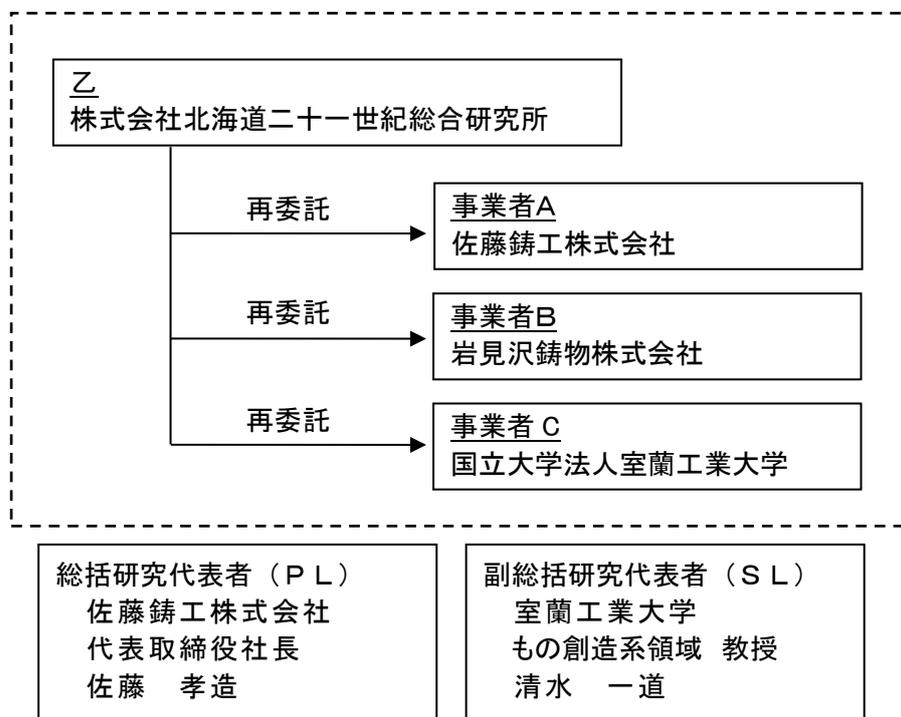
プロジェクトの円滑なる運営のため、研究開発委員会など打合せ機会の日程調整、プロジェクト参加機関間の各調整、プロジェクトの進捗管理、プロジェクトの予算管理などを実施した。

### (2) 委託期間

平成23年8月1日～平成26年3月31日

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】株式会社北海道二十一世紀総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
原田 実	取締役	⑥
布川 勝治	主任研究員	⑥

【再委託先】

佐藤鋳工株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
佐藤 孝造	代表取締役社長	①②③④⑤
三浦 孝幸	品質保証部品質管理課長	①②③④⑤
八谷 和夫	専務付特命部長	①②③④⑤
中道 邦弘	品質保証部技術課長	①②③④⑤
佐橋 信明	総務部長	⑤
川村 政信	品質保証部技術課長	①②③④⑤
山本 将大	総務部付	①②③④⑤
原 幸雄	製造部製造1課鋳造 1Gr	①②

岩見沢鋳物株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
白井 邦彦	代表取締役	①②③④⑤
白井 雅人	常務取締役	①②③④⑤
河村 正規	工場長	①②③④⑤
桑原 崇文	副工場長	①②③④⑤
栗田 誠志郎		①②③④⑤

国立大学法人 室蘭工業大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
清水 一道	もの創造系領域 教授	①②③④⑤
伊藤 幸	事務補佐員	①②③④⑤
佐藤 良輔	技術補佐員	①②③④⑤

(3) 研究支援体制

検討委員会メンバー

■学識経験者

- 木口 昭二 近畿大学工学部機械工学科 教授
- 野口 徹 野口材料技術コンサルタント
- 堀江 皓 岩手大学 工学部附属鋳造技術研究センター 客員教授

■コンソーシアムメンバー

- 佐藤 孝造 佐藤鋳工株式会社 代表取締役社長  
(総括研究代表者)
- 白井 雅人 岩見沢鋳物株式会社 常務取締役
- 清水 一道 室蘭工業大学 もの創造系領域材料工学ユニット 教授  
(副総括研究代表者)
- 原田 実 株式会社北海道二十一世紀総合研究所 取締役 業務総括

■オブザーバー

- 経済産業省北海道経済産業局

## 1-3 成果概要

### ①球状化処理方法の変更による高強度球状黒鉛鑄鉄製造技術の開発

(佐藤鑄工株式会社、岩見沢鑄物株式会社、国立大学法人室蘭工業大学)

球状黒鉛鑄鉄を製造する際に使用する球状化剤を選択し、レアアースを含有した球状化剤とレアアースレスの球状化剤を使用して製造した薄肉供試材によって各種試験を実施した。

レアアースを含有した球状化剤とレアアースレスの球状化剤で比較すると、各組織に大きな差は無く、黒鉛の球状化率に関しても80%前後であり、機械的性質は良好であった。

### ②レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の薄肉化技術の開発

(佐藤鑄工株式会社、岩見沢鑄物株式会社、国立大学法人室蘭工業大学)

球状化剤のレアアース含有量を調整し、製造した薄肉の球状黒鉛鑄鉄によって各種試験を実施。レアアース含有量を変化させた場合でも肉厚によって黒鉛球状率および黒鉛粒数は低下していなかった。チル化に関しても肉厚3mmにおいてチル化を抑えており、良好な性質を示した。

さらに、レアアース含有量を調整(2.0%、0.5%、0.3%)した球状化剤を使用し疲労試験を行った結果、レアアース含有量の違いによる差は小さかったことから、レアアース含有量は0.3%まで低減可能であることがわかった。

### ③内部欠陥制御技術の開発

(佐藤鑄工株式会社、岩見沢鑄物株式会社、国立大学法人室蘭工業大学)

佐藤鑄工株式会社、岩見沢鑄物株式会社の実体製品から切り出した小型シャルピー試験片による衝撃試験を行った結果、吸収エネルギーの差は0.1~0.3Jと小さく、レアアース含有量による影響は生じなかった。

### ④品質確認システムの確立

(佐藤鑄工株式会社、岩見沢鑄物株式会社、国立大学法人室蘭工業大学)

溶湯が冷却するときの冷却曲線を解析する装置を導入し、データを蓄積。得られた基礎データから、有用なパラメーターを抽出することができることがわかった。

### ⑤事業化への検討

(佐藤鑄工株式会社、岩見沢鑄物株式会社、国立大学法人室蘭工業大学)

他の研究機関においてもレアアース含有量によるひけ性の調査・検討が行われており、本研究開発の方向性を確認した。また、接種材メーカーの研究結果から、レアアース含有量0.3%の実験結果は、今後のレアアース低減の目安の一つになることが確認された。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

##### ①事業管理者の連絡窓口

所属	株式会社北海道二十一世紀総合研究所
役職	業務総括担当部長
氏名	原田 実
電話	011-231-3053
FAX	011-231-3143
E-mail	harada@htri.co.jp

##### ②開発実施者の連絡窓口

###### ■総括研究代表者

所属	佐藤鋳工株式会社
役職	代表取締役社長
氏名	佐藤 孝造
電話	0164-32-2130
FAX	0164-32-2267
E-mail	k_sato@satochuko.co.jp

###### ■副総括研究代表者

所属	室蘭工業大学
役職	もの創造系領域 教授
氏名	清水 一道
電話	0143-46-5651
FAX	0143-46-5651
E-mail	shimizu@mmm.muroran-it.ac.jp

## 第2章 研究開発の内容

### 1. 球状化処理方法の変更による高強度球状黒鉛鑄鉄製造技術の開発

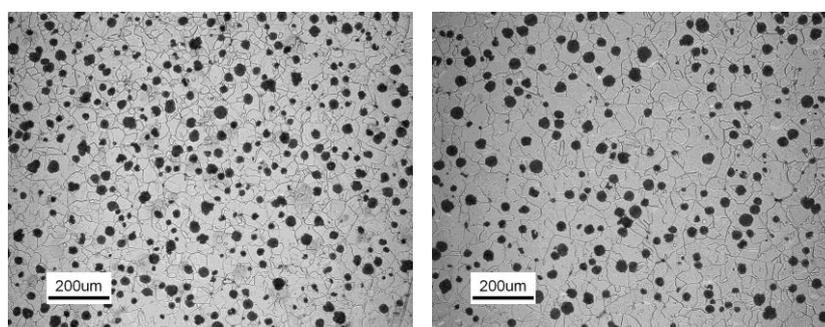
球状黒鉛鑄鉄を製造する際に使用する球状化剤を選択し、レアアースを含有した球状化剤とレアアースレスの球状化剤を使用して製造した薄肉供試材によって各種試験を行うことで、レアアースの有無による黒鉛の球状化率や機械的性質に及ぼす影響を調査した。

#### (1) 球状化剤の選定

使用する球状化剤の選定を行うにあたり、接種剤にレアアースを含有した Fe-Si-Bi と黒鉛の球状化を補助する Ca の添加量を増加させたレアアースレスの Fe-Si-Ca を使用し、小型真空高周波溶解炉にて室蘭工業大学でインゴットを製造した。

球状化剤は同一の物を使用し、接種方法は1次接種を取鍋接種、2次接種を注湯流接種とした。製造したインゴットを固体金属発光分析装置にて元素分析を行った。

Fe-Si-Bi と Fe-Si-Ca の接種剤を使用したインゴットの性質を比較すると、化学組成や機械的性質に大きな差は無く、80%以上で良好な機械的性質を示すことが知られている黒鉛の球状化率においても、レアアースレスの Fe-Si-Ca を使用した場合でも 90%を有していた。



Fe-Si-Bi

Fe-Si-Ca

図1 製造したインゴットの組織観察写真

表1 黒鉛の性状と機械的性質

	球状化率 [%]	粒径 [ $\mu\text{m}$ ]	硬さ [HV]	引張強さ [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
Fe-Si-Bi	85.6	25.6	145	396
Fe-Si-Ca	90.5	30.7	142	370

## (2) 薄肉供試材の製造

(1) より、レアアースの代わりに Ca の添加量を増加させた球状化剤を使用した薄肉供試材の製造を行った。サンドイッチ法による球状化处理、接種処理を施した後、幅 110mm、長さ 40mm、厚さ 3mm の薄肉板状供試材を製造した。球状化剤はレアアースを含有した物と Ca の添加量を増加させたレアアースレスの物の 2 種類を使用し、接種剤は統一した。接種方法は 1 次接種を取鍋接種、2 次接種を注湯流接種とした。

自動車部品によって使用される組織が異なることを考慮し、組織をフェライト地 (FDI)、パーライト率が 30% (PDI(30))、パーライト地 (PDI) の 3 種類とした。

各供試材の一部を樹脂埋めし光学顕微鏡にて組織観察を行った。レアアースを含有した球状化剤とレアアースレスの球状化剤で比較すると、各組織に大きな差は無く、黒鉛の球状化率に関しても 80%前後であり、機械的性質は良好であった。以上の結果から、製造した薄肉供試材はレアアースレスの球状化剤を使用した場合でも良好な性質を有していた。

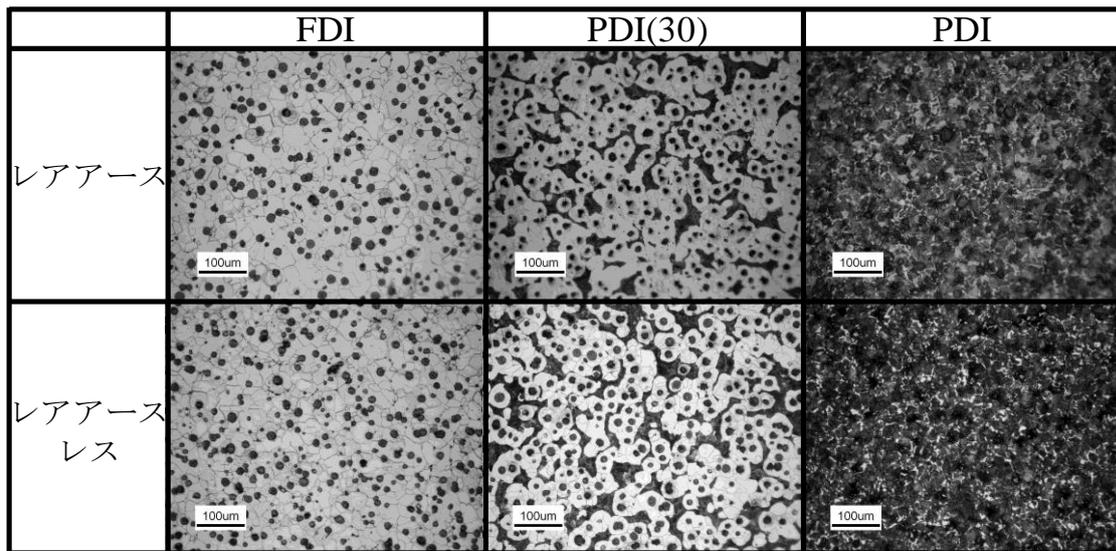


図2 各供試材の組織写真

## 2 レアースレス球状黒鉛鑄鉄の薄肉化技術の開発

### (1) レアースレス球状黒鉛鑄鉄の薄肉化技術の開発（平成 24 年度）

室蘭工業大学で選定を行った鑄造方法で製造した薄肉供試材がレアースレスにおいても良好な性質を有していたことから、次の段階として佐藤鑄工株式会社と岩見沢鑄物株式会社で階段状試験片や実体製品を製造し、各種試験を行った。

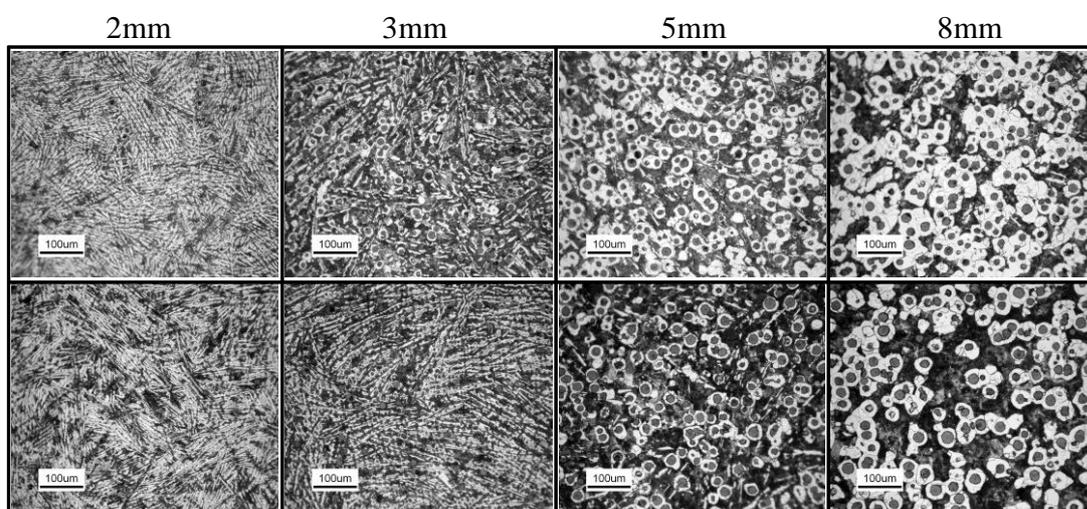
#### ①階段状試験片によるチル化測定

鑄造品の肉厚によるチル化への影響を調査するために、薄肉階段状試験片を製造した。階段状試験片の寸法は幅 100mm、長さ 400mm、厚さが 2、3、5、8mm の 4 段とした。同じ木型を使用して佐藤鑄工と岩見沢鑄物においてレアースとレアースレスの球状化剤を使用して階段状試験片を各 2 個製造した。接種方法は 1 次接種を取鍋接種、2 次接種を注湯流接種とした。

段状試験片の各肉厚で一部を樹脂埋めし、光学顕微鏡にて組織の観察を行った。図 3～6 に組織観察写真を示す。表 2 に黒鉛の球状化率および機械的性質を示し、レアースの有無による球状化率の比較を行ったグラフを図 7 に示す。

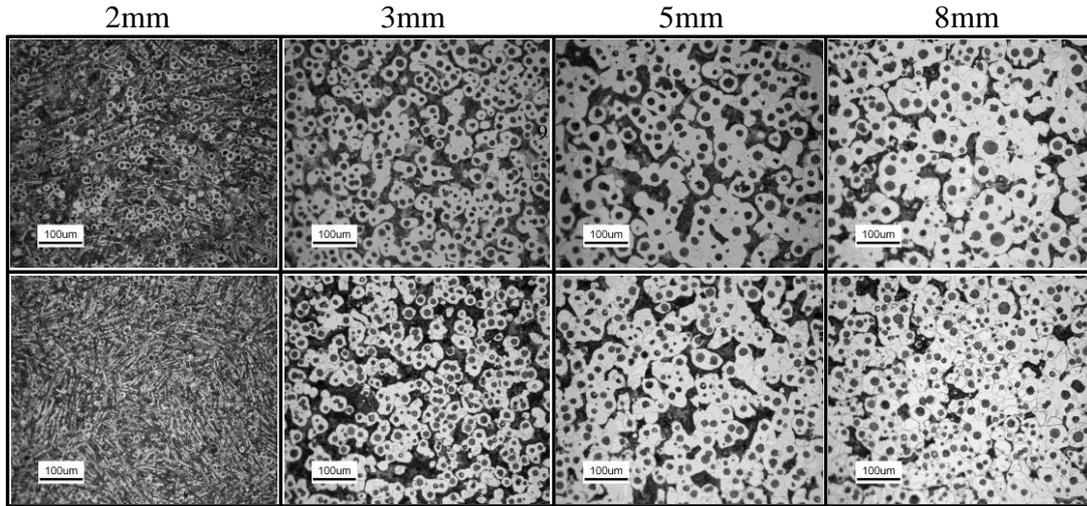
図 3～6 より、肉厚が 2mm ではレアースの有無に関わらずチル化しており、3mm ではレアースでチル化を抑えているものもあったが、レアースレスではチル化している物が多かった。5、8mm ではレアースの有無に関わらずチル化を抑えていた。表 2 より各階段状試験片における黒鉛の球状化率は肉厚 3、5、8mm で 80%以上を有していた。

以上のことから、レアースレスでは安定してチル化を抑え、黒鉛の球状化率が良好となっていたのは肉厚 5mm 以上であった。



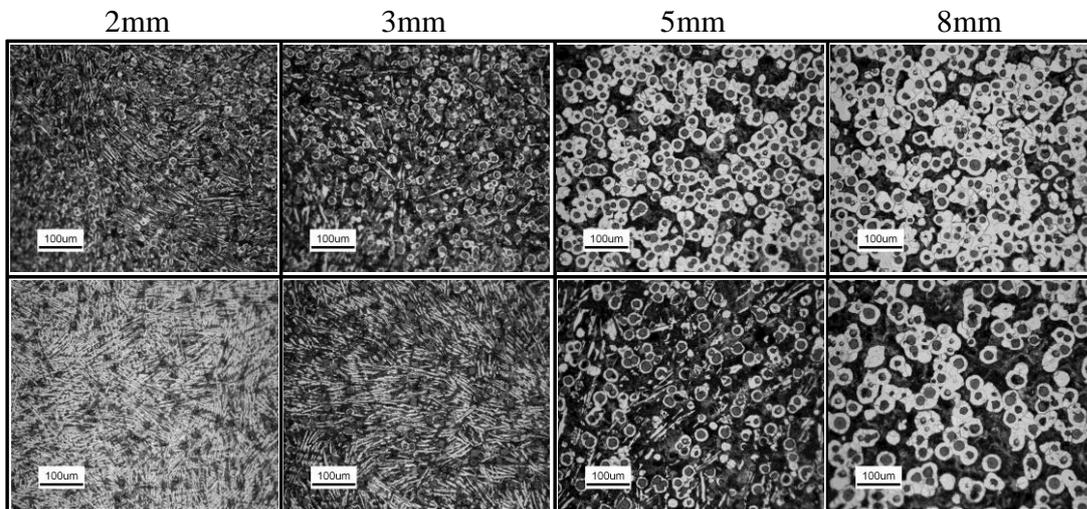
上段:レアース 下段:レアースレス

図 3 階段状試験片の各肉厚における組織観察写真(佐藤鑄工 1 回目)



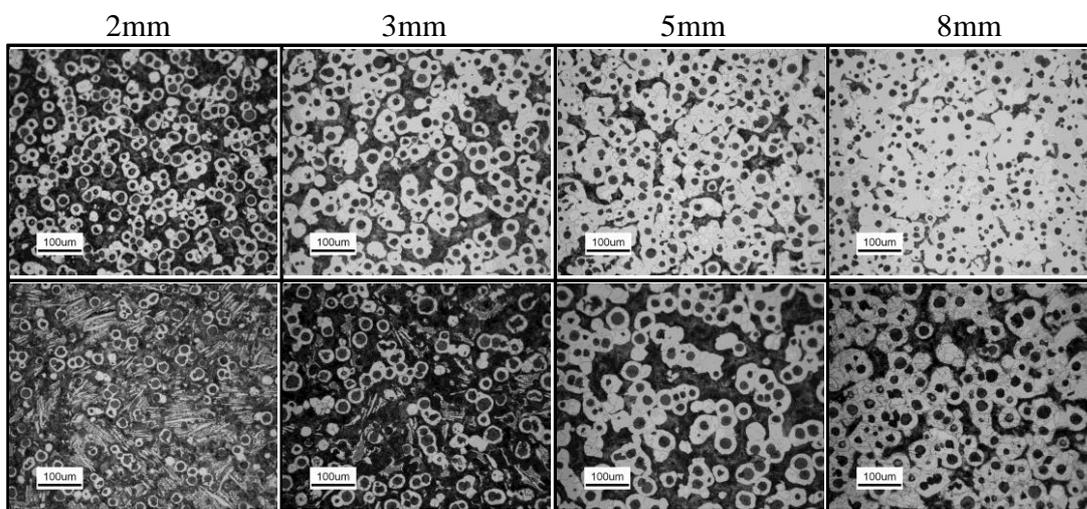
上段:レアース 下段:レアースレス

図4 階段状試験片の各肉厚における組織観察写真(佐藤鑄工2回目)



上段:レアース 下段:レアースレス

図5 階段状試験片の各肉厚における組織観察写真(岩見沢鑄物1回目)



上段:レアース 下段:レアースレス

図6 階段状試験片の各肉厚における組織観察写真(岩見沢鑄物2回目)

表 2 各階段状試験片における黒鉛の球状化率および引張強さと硬度

			黒鉛球状化率 [%]				引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	硬度 [HB]
			2mm	3mm	5mm	8mm		
佐藤鑄工	レアアース	1回目	52	85	80	82	507	176
		2回目	56	73	79	84	516	179
	レアアースレス	1回目	79	93	91	93	496	168
		2回目	66	89	92	89	476	168
岩見沢鑄物	レアアース	1回目	74	78	90	89	585	195
		2回目	63	88	84	81	627	209
	レアアースレス	1回目	83	85	77	90	580	193
		2回目	84	83	87	89	660	219

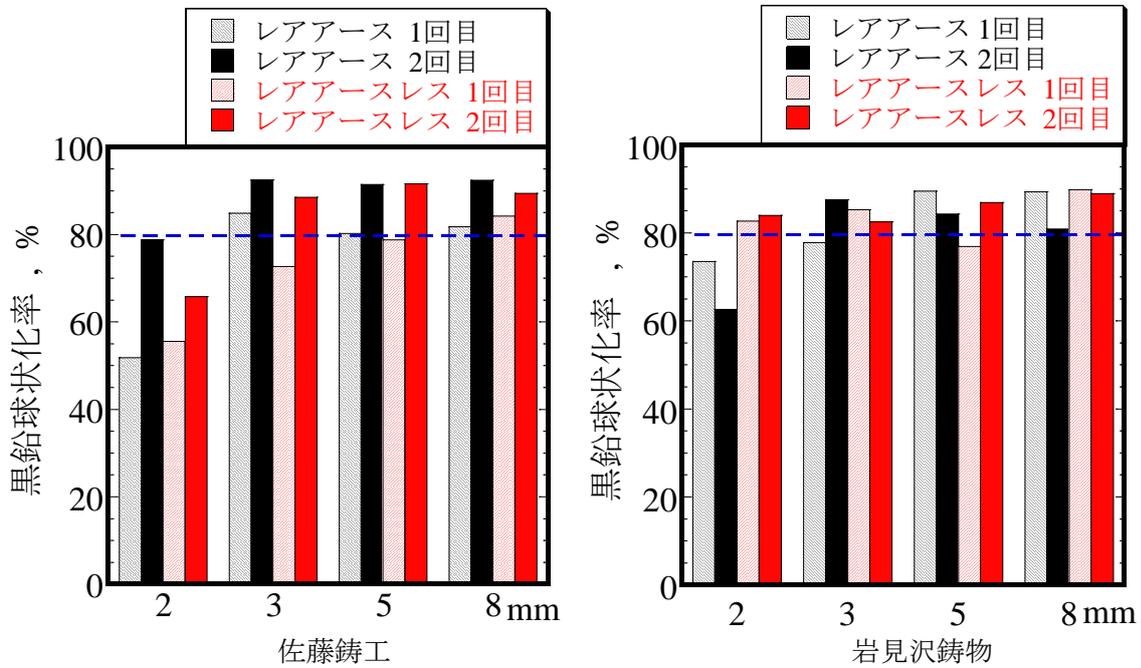


図 7 階段状試験片の各肉厚における黒鉛の球状化率

## (2) レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の薄肉化技術の開発（平成 25 年度）

### ①開発概要

平成 24 年度に行われた研究より、レアアース含有量 0%と 2.0%の球状化剤を使用した球状黒鉛鑄鉄による疲労試験を行った結果、レアアース含有量 0%では試験片内部に存在する鑄造欠陥によって疲労強度が低下した。そこで、得られた知見を元に球状化剤のレアアース含有量を調整し、製造した薄肉の球状黒鉛鑄鉄によって各種試験を行うことで、レアアース含有量による黒鉛の球状化率や機械的性質に及ぼす影響を調査した。

### ②球状化剤の選定

平成 24 年度の研究成果から球状化剤中のレアアース含有量を 0%と 2.0%に加えて 0.3%と 0.5%を使用して供試材を製作した。接種剤は全試験において統一した物を使用し、接種方法を取鍋接種および注湯流接種とした。

### ③階段状試験片によるチル化測定

鑄造品の肉厚によるチル化への影響を調査するために階段状試験片を製作した。階段状試験片の寸法は幅 100mm、長さ 300mm、厚さを 3, 5, 8mm の 3 段とした。使用した木型を図 3 に示す。平成 24 年度の研究成果より肉厚 5mm まではチル化を抑制することが可能であったが、肉厚 3mm ではチル化していたことから、25 年度においては注湯口を厚肉側から薄肉側に変更し実験を行った。

図 8, 9 より各社において、球状化剤中のレアアース含有量を変化させた場合でも肉厚によって黒鉛球状率および黒鉛粒数は低下していなかった。チル化に関しても肉厚 3mm においてチル化を抑えており、良好な性質を示した。

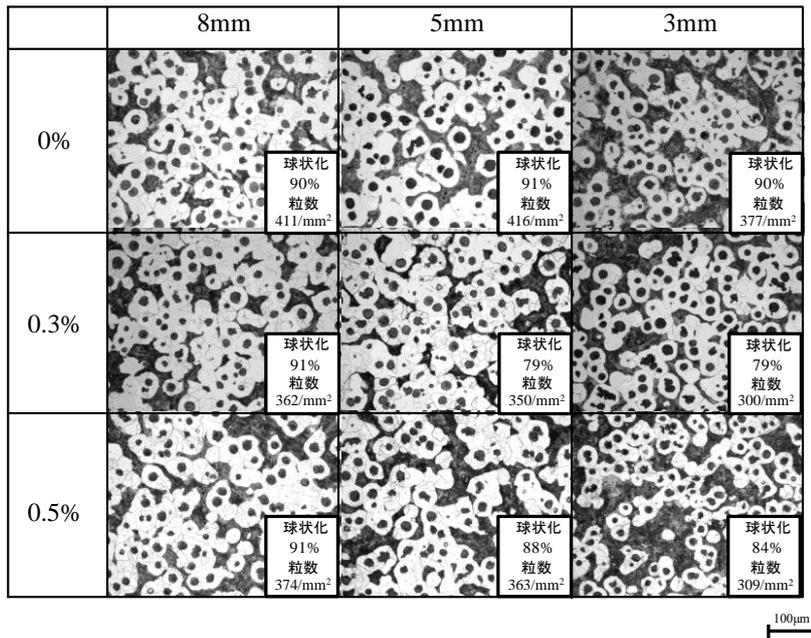


図8 各階段状試験片の組織および黒鉛性状（岩見沢鋳物）

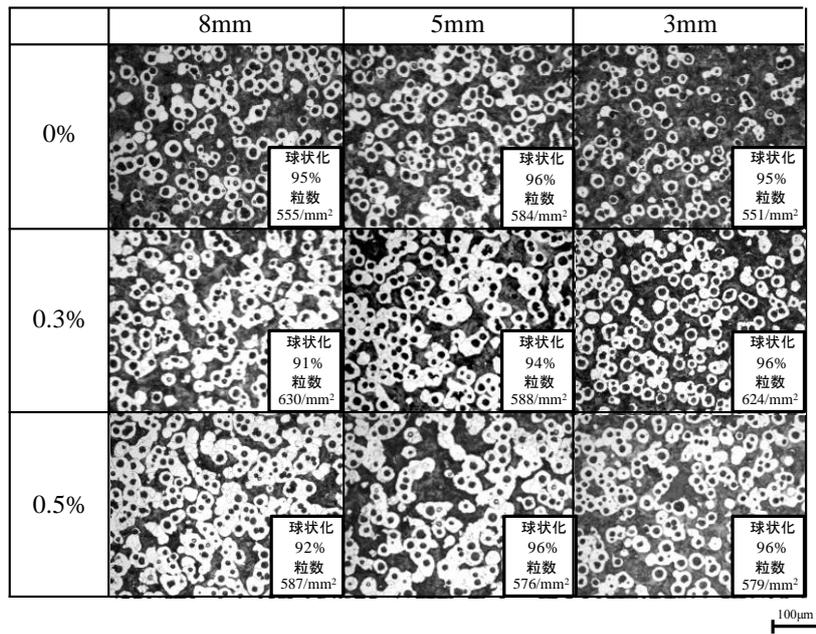


図9 各階段状試験片の組織および黒鉛性状（佐藤鋳工）

#### ④薄肉供試材による疲労試験

レアアース含有量を調整した球状化剤を使用し、疲労試験を行った。その結果を以下に記す。図 10 に示す薄肉用の木型を使用して供試材を製作した。各社において球状化剤は表 1 に示したものを使用した。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 前後にて注湯を行った。幅 120mm、長さ 40mm、厚さ 5mm の薄肉板状供試材を製造した。

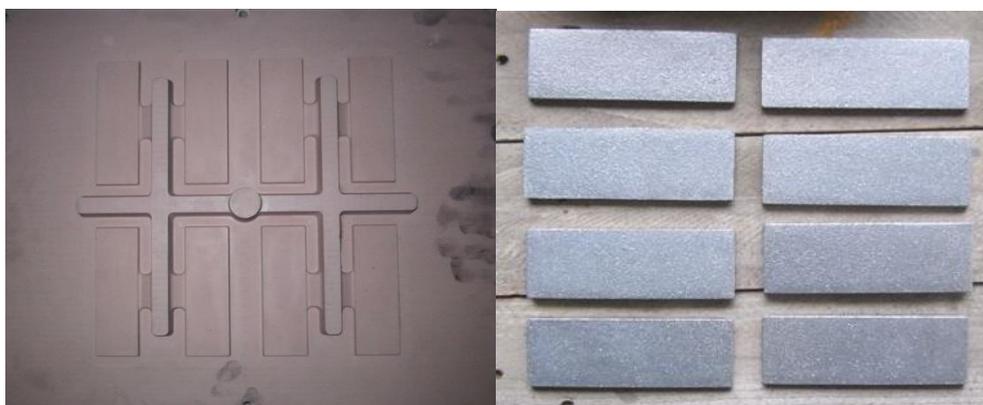


図 10 使用した木型および製作した薄肉板状供試材

各社で製作した供試材の組織写真を図 11, 12 に示す。図 11 より岩見沢鋳物製作の供試材では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。図 12 より佐藤鋳工製作の供試材はパーライト率に差があり疲労試験結果に影響を及ぼす可能性があるため、室蘭工業大学にて製作した供試材を用いて比較を行った (図 13)。

製作した試験片を平滑材に加工し、試験を行った。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  $1 \times 10^7$  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。

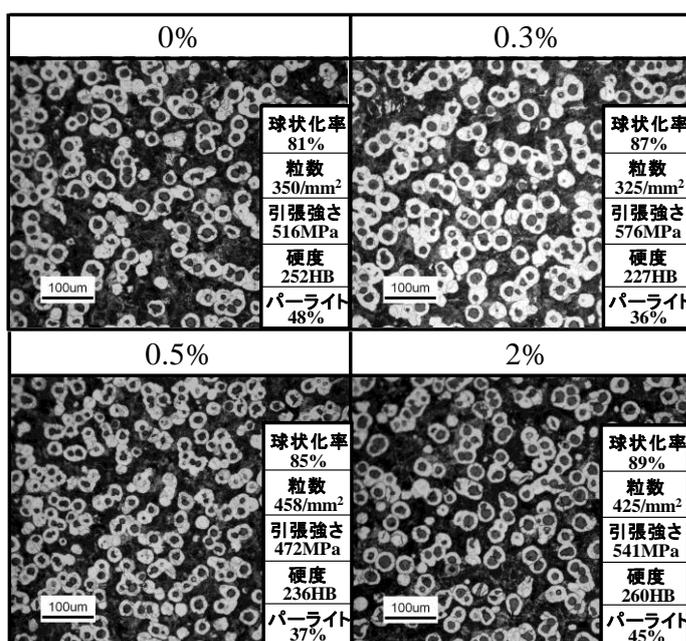


図 11 各供試材の組織写真及び機械的性質 (岩見沢鋳物)

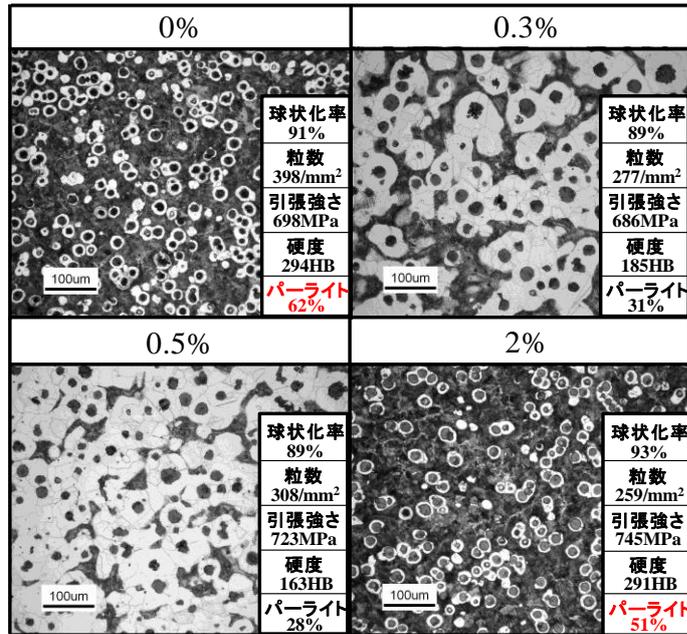


図 12 各供試材の組織写真及び機械的性質（佐藤鑄工）

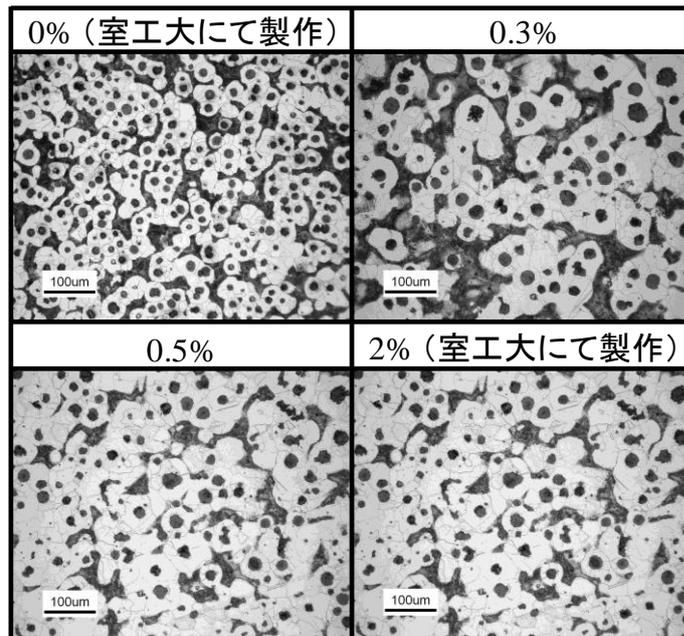


図 13 各供試材の組織写真（室工大、佐藤鑄工）

各社における試験結果として横軸を繰り返し数、縦軸を試験片の負荷応力とした S-N 線図を図 14 に示す。図 14 より岩見沢鑄物において、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。佐藤鑄工についてもレアアース含有量 2.0, 0.5, 0.3% では 309~339MPa であったのに対し、0% では 270MPa であり、疲労強度は 13%~20% 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。破面観察の結果を図 15 に示す。図 15 より破面に鑄造欠陥が確認され

た。鑄造欠陥は、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 $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデルを用いた。 $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデルは鑄造欠陥が内接する矩形範囲面積の平方根のことであり、欠陥の面積をき裂長さに代替することができる。これを用いることで形状の異なる鑄造欠陥でも比較が可能になる。求めた $\sqrt{\text{area}}$  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 $\Delta K$  を以下の式にて算出した。

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

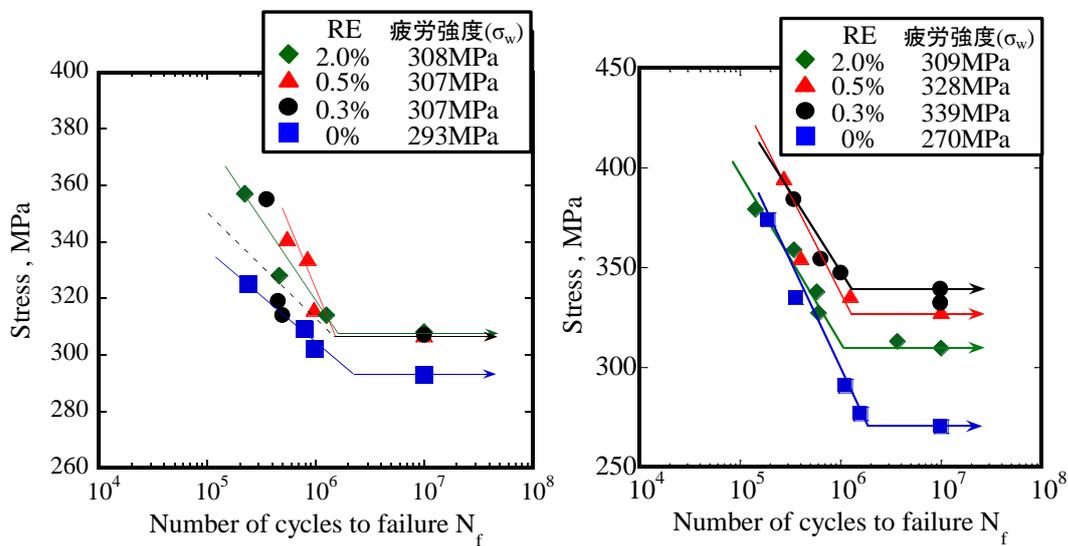
$\alpha$  は定数であり、内部欠陥は  $\alpha = 0.5$ 、表面欠陥は  $\alpha = 0.65$  である。

また同時に、下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th}$  を以下の式から求めた。

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

Hv は各試験片のビッカース硬さを表す。

$\Delta K_{th}$  は、き裂が伝播する最小の $\Delta K$  のことであり、 $\Delta K$  が $\Delta K_{th}$  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 16 に $\sqrt{\text{area}}$  を適応した鑄造欠陥を示し、表 3、4 に $\Delta K$ 、 $\Delta K_{th}$  を算出した結果を示す。表 3、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、1.47 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。レアアースを含有した球状化剤における $\Delta K$ 、 $\Delta K_{th}$  の差は小さかったことから、レアアース含有量は 0.3% まで低減可能である。



岩見沢鑄物

佐藤鑄工

図 14 各社における疲労試験結果

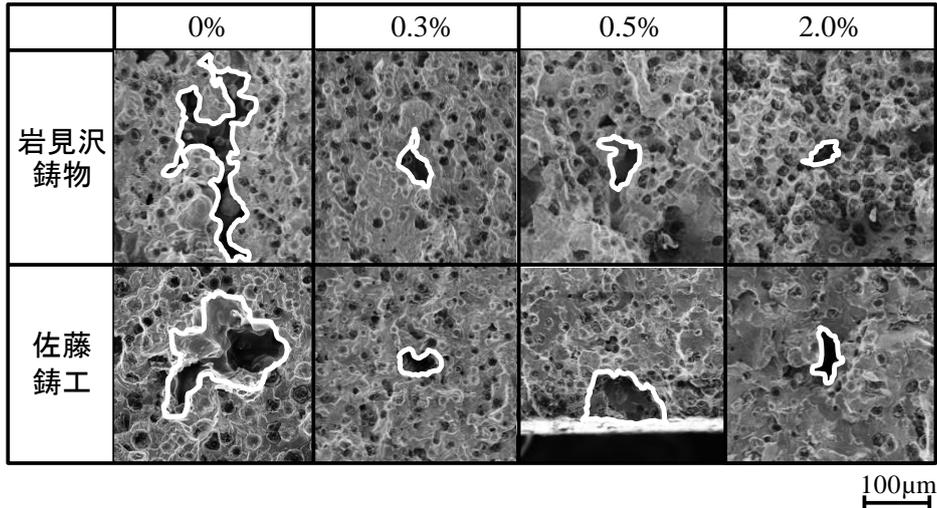


図 15 各試験片の破面で観察された最大寸法の鋳造欠陥

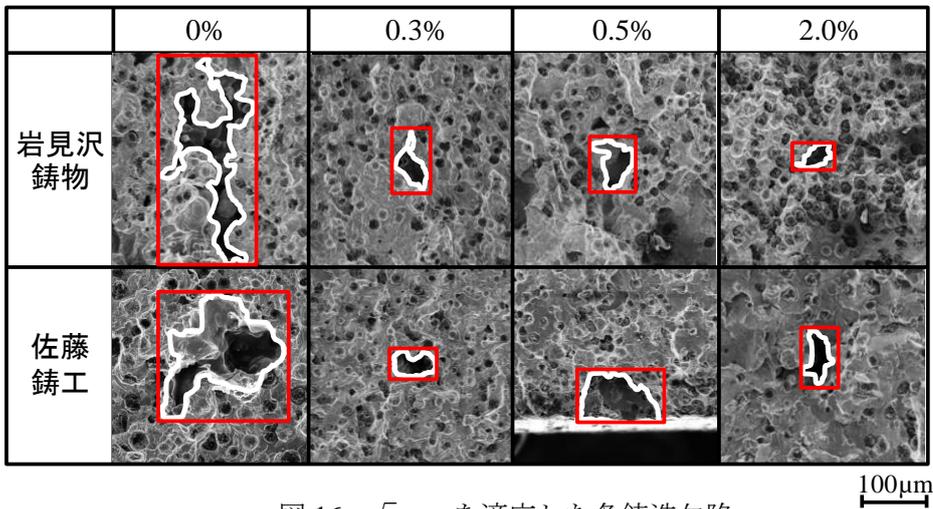


図 16  $\sqrt{\text{area}}$  を適応した各鋳造欠陥

表 3  $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ 、 $\Delta K$ 、 $\Delta K_{th}$  の結果 (岩見沢鋳物)

RE	0%	0.3%	0.5%	2%
Stress[MPa]	302	314	316	314
$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}[\mu\text{m}]$	295	74	78	52
$\Delta K[\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$	9.2	4.8	4.9	4.0
$\Delta K_{th}[\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$	6.4	4.1	4.0	3.7
$\Delta K/\Delta K_{th}$	1.44	1.17	1.24	1.08

表 4  $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ 、 $\Delta K$ 、 $\Delta K_{th}$  の結果 (佐藤鋳工)

RE	0%	0.3%	0.5%	2%
Stress[MPa]	335	347	336	335
$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}[\mu\text{m}]$	203	74	128	74
$\Delta K[\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$	8.5	5.3	6.7	5.1
$\Delta K_{th}[\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$	5.8	4.1	4.9	4.3
$\Delta K/\Delta K_{th}$	1.47	1.30	1.38	1.19

### 3. 内部欠陥制御技術の開発

#### (1) 開発概要

各社において実体製品を製作し、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。実体製品から切り出すにあたり、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、図 17 に示す小型のシャルピー試験片を使用した。試験には図 18 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。

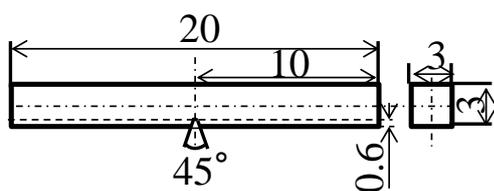


図 17 小型シャルピー衝撃試験片

図 18 小型試験片用シャルピー衝撃試験機

#### (2) 農機具部品による小型シャルピー試験（岩見沢鋳物による実体試験）

図 19 に使用した農機具部品からの切り出し位置を示す。注湯位置からの距離によって 3 か所切り出し位置を設定し試験を行った。各試験片の組織写真を図 20 に示す。図 20 より注湯位置によってパーライト率に差があったがレアアース量による差は小さく、黒鉛の球状化率および粒数に関しても良好であった。

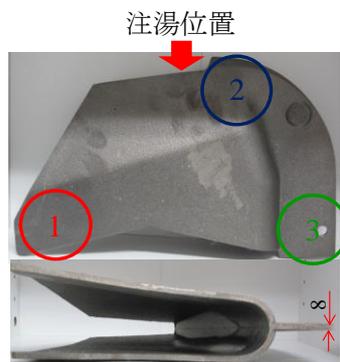


図 19 試験片切り出し箇所

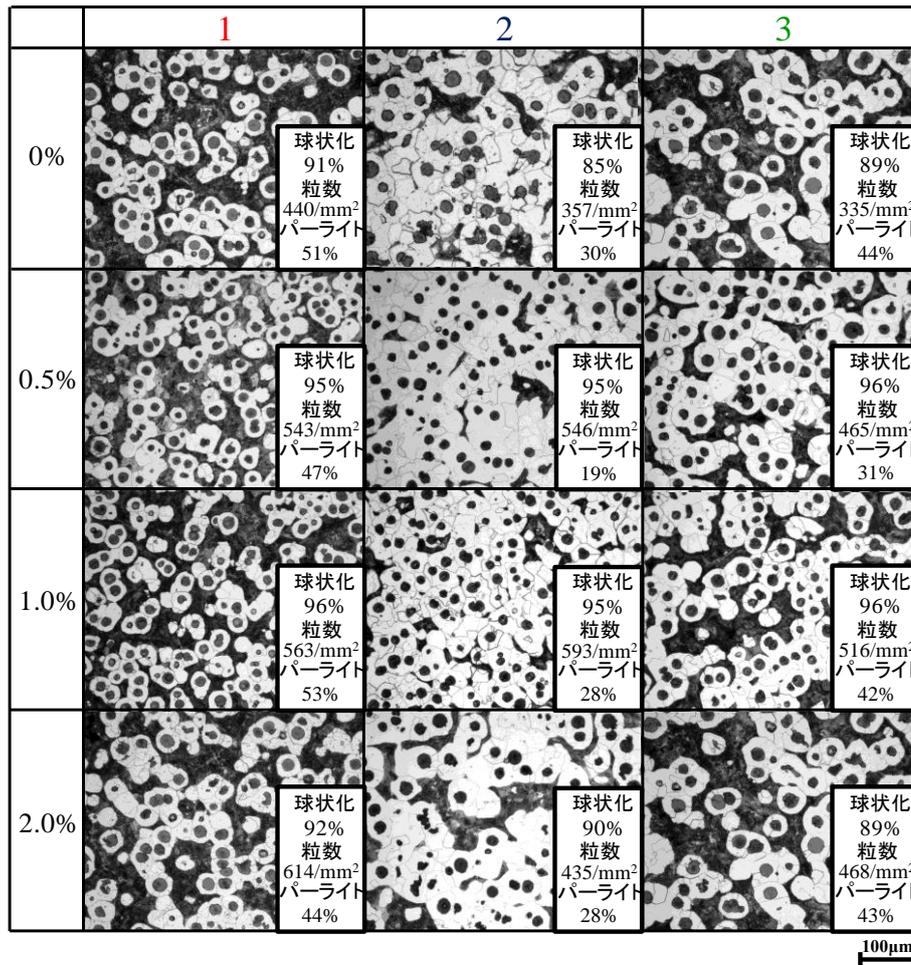


図 20 各供試材の組織および黒鉛性状とパーライト率

図 21 に 0% の各切り出し位置における吸収エネルギーを示す。図 21 より各切り出し箇所において差は確認されなかったため、3 本平均によって吸収エネルギーをまとめたものを図 22 に示す。図 22 より切り出し箇所による差は生じているが、これは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 と小さくなった。

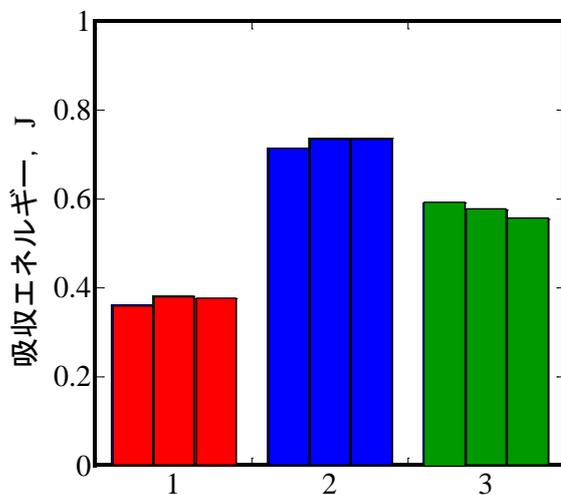


図 21 0%における各切り出し箇所の試験結果

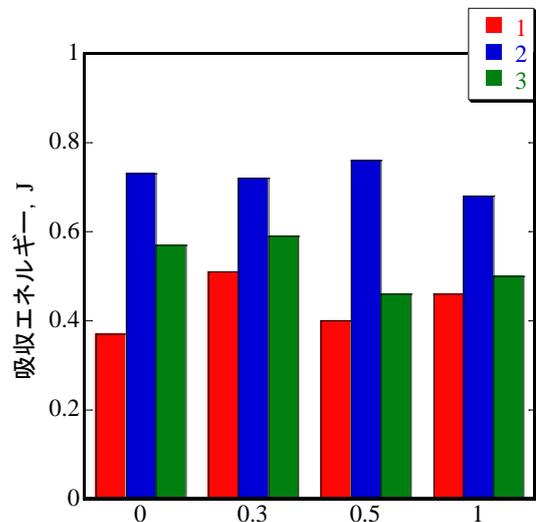


図 22 小型シャルピー衝撃試験結果

### (3) デフケースによる小型シャルピー試験（佐藤鋳工による実体試験）

佐藤鋳工にて製作したデフケースより、小型シャルピー試験片を切り出して試験を行った。製作したデフケースの断面を図 23 に示す。昨年度行った 0%と 1.5%に加えて 0.3%と 0.5%を使用し試験結果を比較した。昨年度の結果より切り出し位置において大きな差は確認されなかったことから、切り出し位置はひげ巣のみとした。切り出した試験片の各組織を図 24 に示す。図 24 より黒鉛の球状化率および粒数は良好な性質を示した。

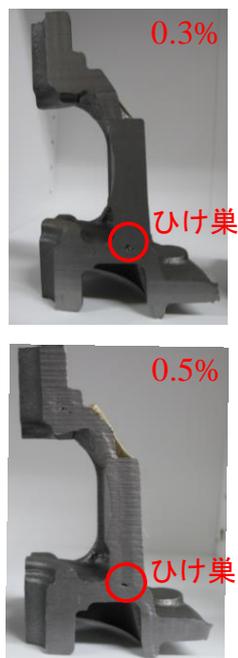


図 23 デフケースの断面

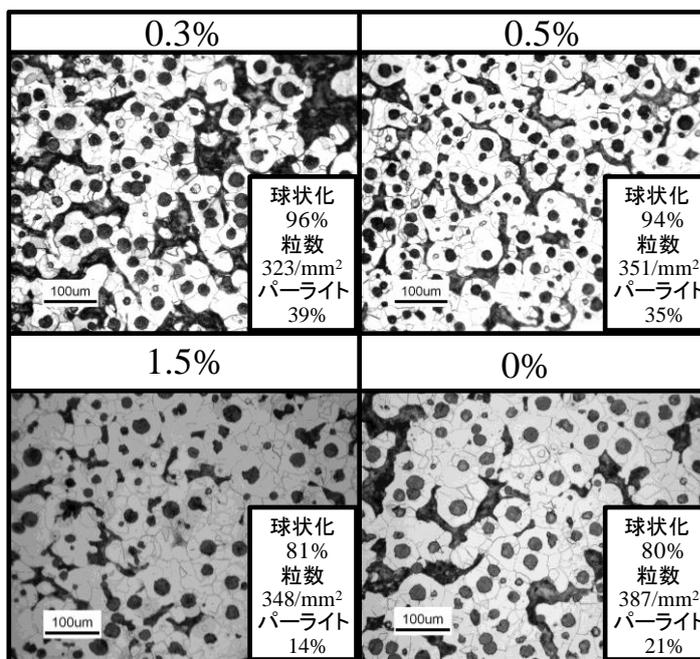


図 24 各試験の組織写真および黒鉛性状とパーライト率

図 25 にレアアース含有量 0.3%と 0.5%のデフケースにおける吸収エネルギーを示す。図 25 より各デフケースにおいて差は確認されなかったため、3本平均によって吸収エネルギーをまとめたものを図 26 に示す。図 26 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 1.5J 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 程度の差となっていたため、影響は小さいと考えられる。

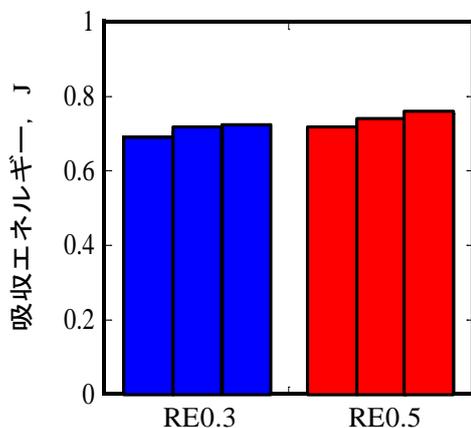


図 25 各デフケースの試験結果

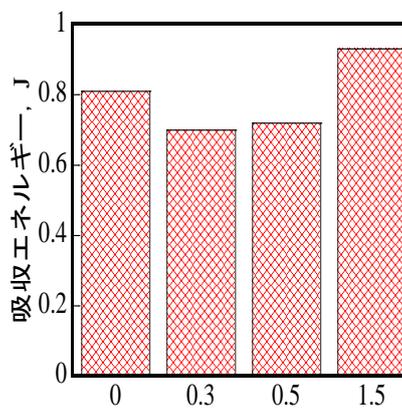


図 26 小型シャルピー衝撃試験結果

## 4. 品質確認システムの確立

### ①熱分析装置「イタカ」から得られる情報

熱分析装置「イタカ」は、溶湯が冷却するときの冷却曲線を解析するものである。イタカの解析結果から得られるパラメーターは、再輝温度(共晶温度の最大値と最小値の差)と共晶凝固温度(共晶温度の最大値を起点として、そこから温度が15℃低下するまでの時間；共晶凝固後半の時間)である。これらのパラメーターから、球状化剤に含まれるレアアースの影響について調査を行った。

### ②溶湯冷却曲線における球状化剤に含まれるレアアースの影響

溶湯冷却曲線は、レアアースあり・なしの大きな違いは見られなかった。また、得られたパラメーター(再輝温度や共晶凝固温度)にも大きな違いは見られなかった。これは、溶湯サンプリング時のバラツキの範囲内にあるため、明確な違いが出なかったものと思われる。

今回の溶湯熱分析結果から球状化剤に含まれるレアアースあり・なしの影響が、明確な溶湯冷却曲線の変化に現れなかった。現状のサンプリング方法において、レアアースなし条件製造の品質保証ツールとしてイタカは実用化まで至らなかった。イタカをレアアースなし条件製造の品質保証ツールとするためには、実験室レベルにおける基礎データの蓄積が必要と思われる。得られた基礎データから、有用なパラメーターを抽出することができると考えられる。

## 5. 事業化への検討

本事業において開発されたレアアースレスおよび低レアアース化球状黒鉛鑄鉄の薄肉化技術の活用方法について、学会研究による発表や、レアアースレス球状化剤・接種剤の販売メーカーの開発状況等を調査した。

日本鑄造工学会の「鑄鉄・レアアースレス高性能鑄鉄合同研究会」の議論内容や全国講演大会の発表によると、他の研究機関においてもレアアース含有量によるひけ性の調査・検討が行われており、本研究開発の方向性を確認した。

また、本州の鑄物メーカーが実施したレアアース含有量の違いによるひけ性のテスト結果を見ると、レアアースを0%にするとひけ性が著しく悪化することが確認されている。

球状化剤メーカーの実施したレアアース含有量の違いによる影響評価を調査したところ、レアアース含有量1.5%、1.0%、0.5%では黒鉛粒数・球状化率ともに一定の水準にあったが、レアアース含有量0%では、黒鉛粒数・球状化率が大きく減少した。接種材メーカーも、レアアース0～0.5%についての調査の必要性を認めている。

この事から、本研究開発で取り組んだレアアース含有量0.3%の実験結果は、今後のレアアース低減の目安の一つになることが期待され、今後の事業化に向けた一つの基準になることが確認された。

## 6. 総括

本研究は、自動車用部品に用いられる薄肉球状黒鉛鑄鉄鑄物をレアアースレス化することを目的とし各種試験を行った。その結果を以下に要約する。

階段状試験片によるチル化測定試験より、昨年度は厚肉側から注湯した場合では3mmの肉厚でチル化していたため、薄肉側からの注湯に変更した結果、各社においてレアアース含有量を低くしても肉厚3mmでチル化を抑えることが可能であった。

レアアース含有量を調整した球状化剤を使用して製作した薄肉球状黒鉛鑄鉄による疲労試験結果を、力学的に定量評価した結果レアアース含有量0.3%まで低減可能であった。

実体製品から切り出した小型シャルピー試験片による衝撃試験を行った結果、吸収エネルギーの差は0.1～0.3Jと小さく、レアアース含有量による影響は生じなかった。