

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「超微細組織鋳鉄材料の創成と鋳鉄品の高機能化に係る技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成23年3月

委託者 東北経済産業局
委託先 財団法人 山形県産業技術振興機構

目 次

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
- 1 - 2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者) 2
- 1 - 3 成果概要 8
- 1 - 4 当該プロジェクト連絡窓口 9

第2章 本論

- 2 - 1 球状黒鉛鑄鉄の黒鉛超微細化
 - (1)基礎技術開発 10
 - (2)効果の検証 11
 - (3)新規鑄型内接種剤の開発と検証 13
- 2 - 2 球状黒鉛鑄鉄の延性・靱性の確保
 - (1)マンガン許容量の究明 14
 - (2)開発材料の物性評価 15
 - (3)実体特性の評価方法の検討 15
- 2 - 3 球状黒鉛鑄鉄の剛性・耐摩耗性の向上
 - (1)合金元素許容量の究明 16
 - (2)開発材料の物性評価 17
 - (3)実体特性の評価方法の検討 18
- 2 - 4 球状黒鉛鑄鉄の耐熱性の向上
 - (1)最終 Si 量の究明 19
 - (2)開発材料の物性評価 19
 - (3)開発材料の試作、評価 20
- 2 - 5 異種金属接合
 - (1)溶接条件の検討 21
 - (2)試作、評価 21

第3章 総括 22

専門用語等の解説 23

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

日本のものづくり産業の国際競争力強化及び新たな事業の創出を図るために、ものづくりの基盤を支える鑄造技術の重要性が掲げられており、鑄鉄材料の高度化が求められている。特に、環境配慮の観点から、エンジンの燃焼効率向上に対応した鑄鉄材料の高機能化が要求されている。

このような背景から、本研究では、自動車部材の耐熱性向上等、川下産業の鑄鉄部材に係る多様なニーズに応えるため、球状黒鉛鑄鉄中の黒鉛を「より細かく、より多く、より均一に」晶出させるための技術を開発すること等によって、剛性や靱性の向上、耐摩耗性の向上及び耐熱性の向上を低コストで実現することを目的とする。

鑄鉄部材の機能性向上という川下産業のニーズに応えるためには、合金元素を多量に添加する必要があるが、合金元素の悪影響を排除するためには「黒鉛の超微細化」が必須である。そこで、本研究開発グループが有する黒鉛超微細化技術を用いて、鑄鉄中の黒鉛を「より細かく、より多く、より均一に」晶出させ、合金元素の有効利用又は無害化を図る。

本研究では、黒鉛超微細化に関するシーズ技術を製造現場で利用できる技術にまでレベルアップするとともに、次の鑄鉄製部材の高度化を目指す。

耐摩耗性や剛性に優れた輸送機械・建設機械用鑄鉄部材

延性や靱性に優れた輸送機械用鑄鉄部材

耐熱性に優れた輸送機械用鑄鉄部材

上記の高度化目標を達成するために、それぞれのサブテーマにおいて以下の目標達成を目指す。

球状黒鉛鑄鉄の黒鉛超微細化

- ・従来材料の黒鉛粒数は100～300個/mm²であるが、本研究では、1000～3000個/mm²の黒鉛粒数を目標とする。
- ・黒鉛微細化効果は時間とともに低下するが、上記の黒鉛粒数を5分間以上維持できる製造技術の開発を目指す。
- ・従来の鑄型内接種剤の主要成分は、Si及びAlであるが、安定した黒鉛超微細化効果を確保するため、Bi又はアルカリ土類金属を含む新たな鑄型内接種剤を開発する。

球状黒鉛鑄鉄の延性・靱性の確保

- ・黒鉛を超微細化したときのMn許容量を明らかにし、鑄放し（低コスト）でFCD400及びFCD450を製造するための技術を確立する。
- ・開発材料の諸物性値は従来材料の物性値と同等以上を目指し、数種類の部材を試作する。

球状黒鉛鑄鉄の剛性・耐摩耗性の向上

- ・黒鉛を超微細化したときの合金元素許容量を明らかにし、熱処理が必須であった従来材料（FCD800）よりも高機能な材料を鑄放し（低コスト）で製造する技術を確立する。目標物性は、引張強さ：900N/mm²以上、硬さ：300HBW以上、疲労特性、耐摩耗性：FCD800以上とする。
- ・輸送機械用及び建設機械用プーリを試作し、試作品実体で性能評価を実施する。

球状黒鉛鑄鉄の耐熱性向上

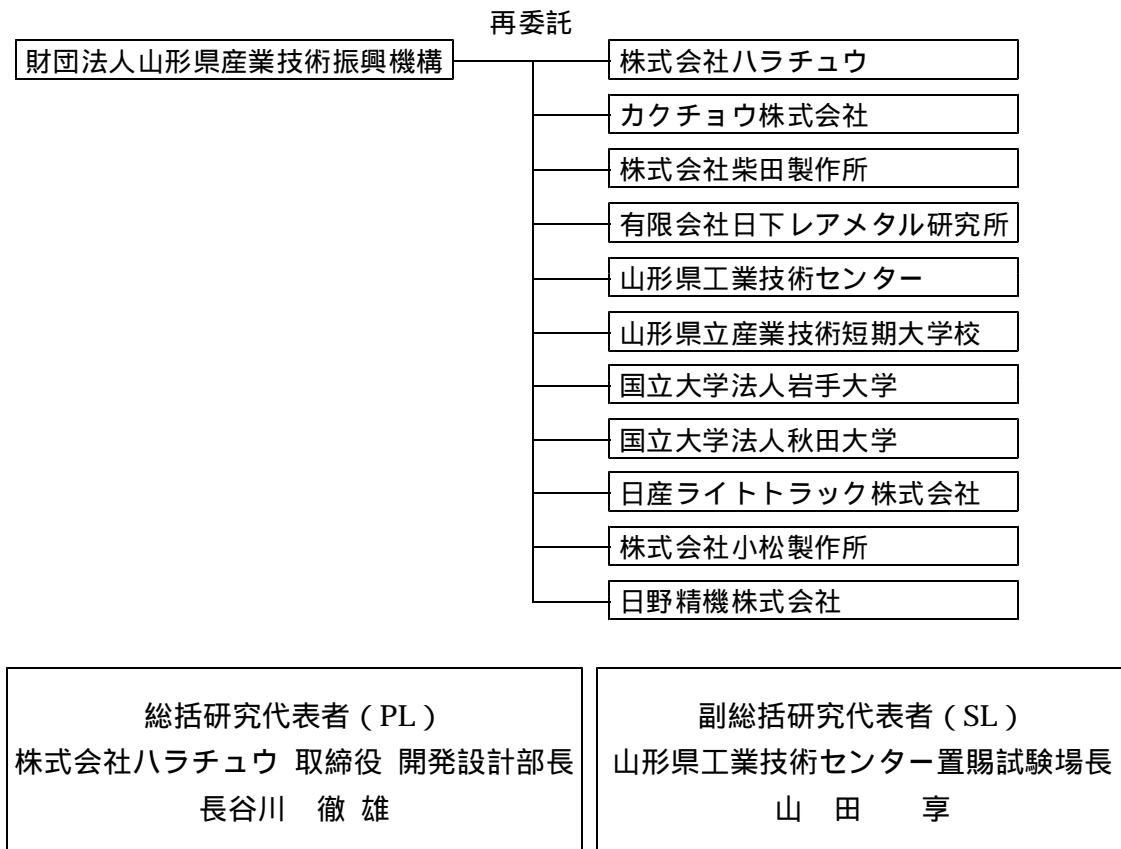
- ・耐熱性向上に有用な Si 含有量は、従来 5% (耐熱温度 900) が上限とされてきたが、5.3% (耐熱温度 930) 含有材料を開発する。
- ・耐熱温度以外の諸物性の目標値は、従来材料 (5%Si) と同等以上とする。
- ・開発材料でエキゾースト・マニホールドを試作し、試作品実体での性能評価を実施する。

異種金属接合

- ・の開発材料とステンレス鋼 (SUS304) とのレーザ溶接接合に関して、最適溶接方式・溶接条件・インサート材を決定し、母材強度以上の接合強度の達成を目指す。
- ・で試作するエキゾースト・マニホールドとステンレス鋼部材との溶接接合品を試作し、試作品実体での性能評価を実施する。

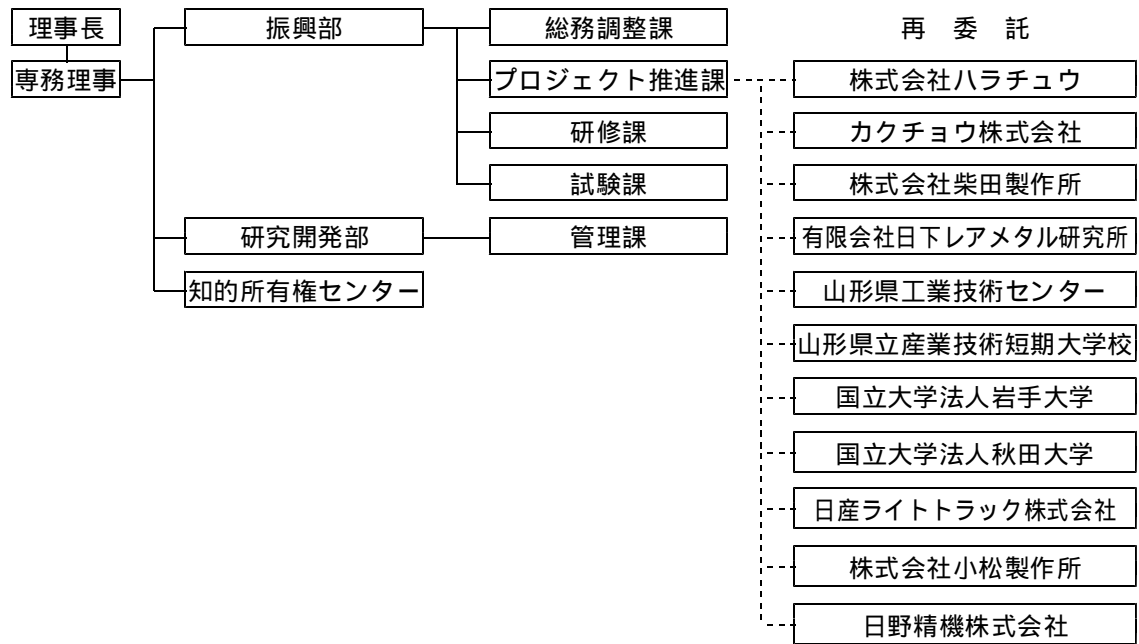
1 - 2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1) 研究組織 (全体)



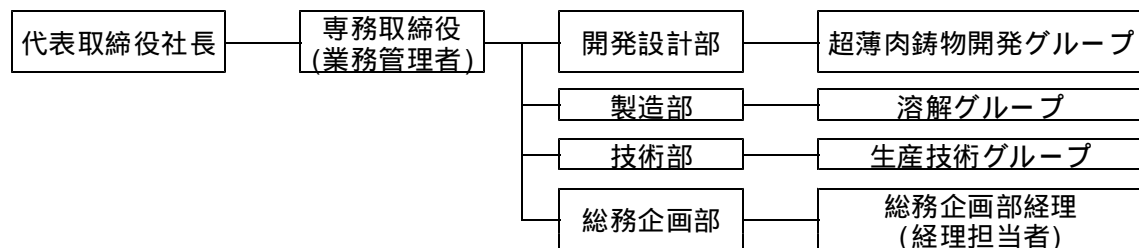
(2) 管理体制

事業管理者：財団法人 山形県産業技術振興機構

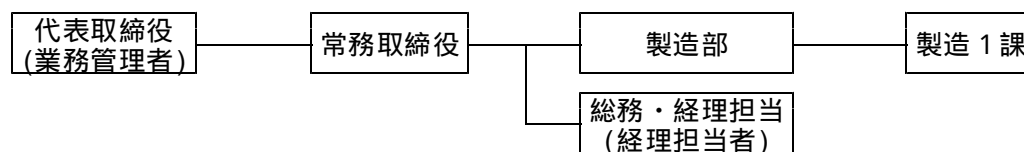


再委託先

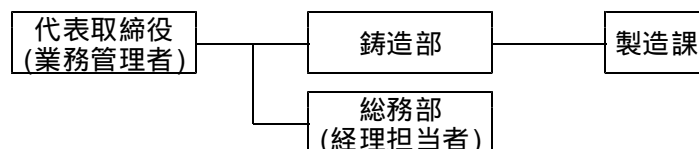
株式会社ハラチュウ



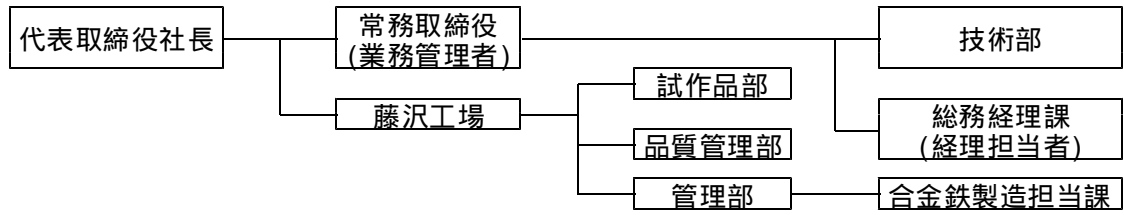
カクチョウ株式会社



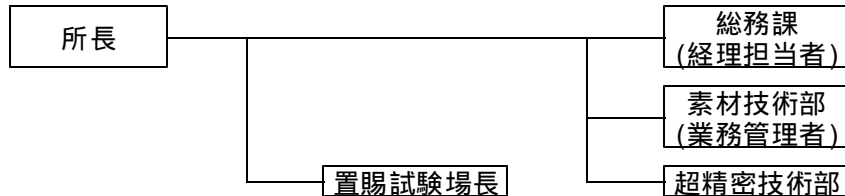
株式会社柴田製作所



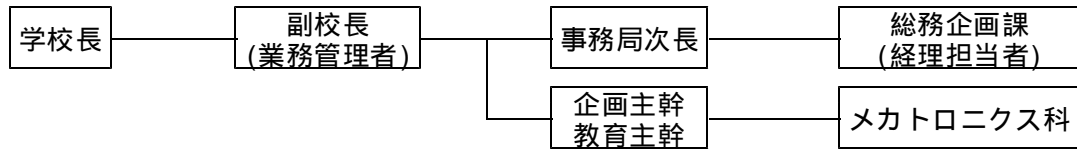
有限会社日下レアメタル研究所



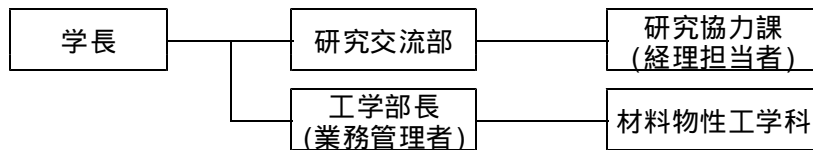
山形県工業技術センター



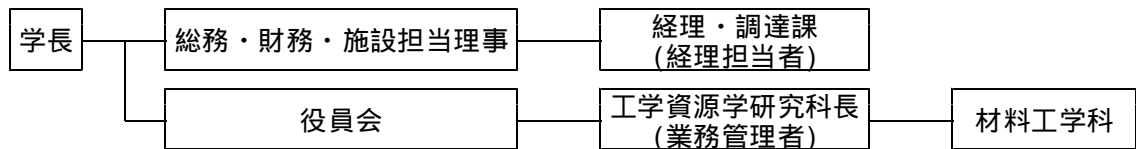
山形県立産業技術短期大学校



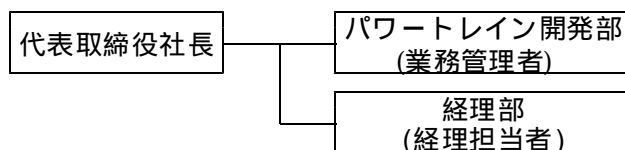
国立大学法人岩手大学



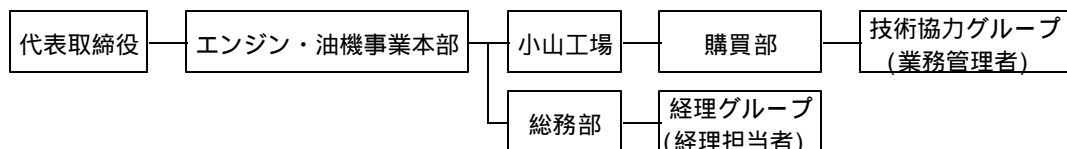
国立大学法人秋田大学



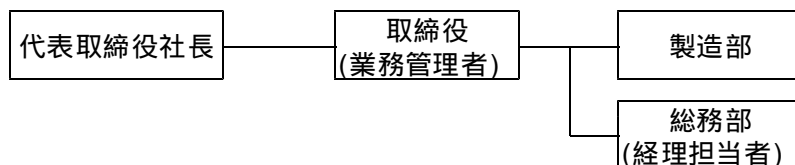
日産ライトトラック株式会社



株式会社小松製作所



日野精機株式会社



(3) 管理員及び研究員

事業管理者（管理員）

財団法人山形県産業技術振興機構

氏名	所属・役職
佐藤 泰幸	振興部プロジェクト推進課 課長
木村 好宏	振興部プロジェクト推進課 主任

再委託先（研究員のみ記載）

株式会社ハラチュウ

氏名	所属・役職
長谷川 徹雄	取締役 開発設計部 部長
金内 一徳	開発設計部超薄肉鋳物開発グループ 係長
河内 美穂子	開発設計部超薄肉鋳物開発グループ 担当
鈴木 修一	製造部溶解鋳造グループ 課長
保科 孝治	技術部生産技術グループ 係長
新田 敬祐	技術部生産技術グループ 担当
會田 伸吾	技術部生産技術グループ 担当

カクチョウ株式会社

氏名	所属・役職
長谷川 文彦	代表取締役
長谷川 芳文	常務取締役
武田 尚也	製造部 部長
高橋 彰一	製造1課 課長
飯坂 隆昭	製造1課 係長
斎藤 裕	溶解担当

株式会社柴田製作所

氏 名	所属・役職
前 田 健 蔵	代表取締役
石 山 広 志	製造課 課長
鈴 木 義 之	機械工作課 課長
柴 田 誠 介	製造課技術係

有限会社日下レアメタル研究所

氏 名	所属・役職
杉 本 安 一	常務取締役
鹿 毛 秀 彦	取締役技術部長
池 田 暁 彦	管理部 次長
谷 岡 志 俊	品質管理部 部長
浪 川 明 宣	試作品部 部長
町 田 昭 司	管理部合金鉄製造担当課 課長
清 時 秀 司	品質管理部

山形県工業技術センター

氏 名	所属・役職
山 田 享	置賜試験場 場長
鈴 木 剛	素材技術部 専門研究員
松 木 俊 朗	素材技術部 研究員
小 川 仁 史	素材技術部 研究員
村 岡 潤 一	超精密技術部 研究員
松 田 丈	超精密技術部 研究員

山形県立産業技術短期大学校

氏 名	所属・役職
来 次 浩 之	メカトロニクス科 教授

国立大学法人岩手大学

氏 名	所属・役職
晴 山 巧	工学部材料物性工学科 准教授

国立大学法人秋田大学

氏 名	所属・役職
麻 生 節 夫	工学資源学部材料工学科 教授
大 口 健 一	工学資源学部材料工学科 准教授
小 松 芳 成	工学資源学部材料工学科 技術専門員

日産ライトトラック株式会社

氏 名	所属・役職
齋 藤 克 彦	パワートレイン開発部 主管
金 子 正 興	パワートレイン開発部

株式会社小松製作所

氏 名	所属・役職
中 山 重 治	エンジン・油機事業本部 主任
服 部 秀 徳	エンジン・油機事業本部
川 口 元	エンジン・油機事業本部
田 中 正 樹	エンジン・油機事業本部 技師

日野精機株式会社

氏 名	所属・役職
菅 井 由 隆	取締役
並 松 芳 弘	製造部 部長
吉 村 二 郎	製造部 参与

(4) 協力者（研究推進委員会 委員）

氏 名	所属・役職	備考
長谷川 徹 雄	株式会社ハラチュウ 取締役 開発設計部 部長	PL(委)
長谷川 文 彦	カクチョウ株式会社 代表取締役	
前 田 健 蔵	株式会社柴田製作所 代表取締役	SL
杉 本 安 一	有限会社日下レアメタル研究所 常務取締役	
山 田 享	山形県工業技術センター 置賜試験場 場長	
久 松 徳 郎	山形県工業技術センター 素材技術部 部長	
松 木 俊 朗	山形県工業技術センター 素材技術部 研究員	
来 次 浩 之	山形県立産業技術短期大学校 メカトロニクス科 教授	
晴 山 巧	国立大学法人岩手大学 工学部材料物性工学科 准教授	
麻 生 節 夫	国立大学法人秋田大学 大学院工学資源学研究科材料工学科 教授	
齋 藤 克 彦	日産ライトトラック株式会社 パワートレイン開発部 主管	
中 山 重 治	株式会社小松製作所 エンジン・油機事業本部 主任	
菅 井 由 隆	日野精機株式会社 取締役	アドバイザー
堀 江 皓	国立大学法人岩手大学 工学部 特任教授	
松 本 明	株式会社サイトウ 執行役員	
柴 田 雅 彦	株式会社平野製作所 取締役部長	アドバイザー

1 - 3 成果概要

(1) 球状黒鉛鑄鉄の黒鉛超微細化

【担当機関：カクチョウ(株)、(株)柴田製作所、(株)ハラチュウ、(有)日下レアメタル研究所、山形県工業技術センター】

鑄型内接種を効果的に利用した「改良２段階接種」により、黒鉛組織の大幅な微細化を達成した。また、肉厚感受性の検討を行い、本技術が薄肉・厚肉品でも応用できることを明らかにした。

改良２段階接種を用いた現場での溶解試験によりを行い、超微細化効果の持続時間が５分以上であることを明らかにした。

開発した Bi 含有鑄型内接種剤の効果を実験室的に検証し、黒鉛粒数が従来品の 1.8 倍になることを明ら試作作製と試作溶解を実施した。

(2) 球状黒鉛鑄鉄の延性・靱性の確保

【担当機関：カクチョウ(株)、山形県工業技術センター、山形県立産業技術短期大学校】
改良２段階接種により黒鉛組織を超微細化した高 Mn 球状黒鉛鑄鉄について実験室的な検討を行い、FCD450 及び 400 規格を満足するための許容 Mn 量を明らかにした。

開発した 0.6%Mn 含有 FCD450 相当材料及び 0.2%Mn 含有 FCD400 相当材料の引張特性、硬さ、疲労特性及び機械加工性を評価した。引張強さ、伸び、硬さのいずれにおいても JIS 規格を満足する特性が得られた。また、疲労特性、機械加工性ともに従来材料と同等以上であることがわかった。

硬さ及び材料の音速と強度との関係から作成した強度の推定式を用いて、試作品の実体強度の評価を試み、妥当な強度を求められることを明らかにした。

(3) 球状黒鉛鑄鉄の剛性・耐摩耗性の向上

【担当機関：(株)柴田製作所、山形県工業技術センター、山形県立産業技術短期大学校、岩手大学、秋田大学、(株)小松製作所、日野精機(株)】

高強度・耐摩耗球状黒鉛鑄鉄に必要な合金元素の種類及び添加量を明らかにした。

開発材料の機械的性質、疲労特性、耐摩耗性及び機械加工性を評価した。この結果、いずれも従来材料と同等以上の特性を有していることがわかった。

開発材料を用いてプーリを試作し、肉厚にかかわらず均一な特性を持つことを確認した。

(4) 球状黒鉛鑄鉄の耐熱性向上

【担当機関：(株)ハラチュウ、日産ライトトラック(株)、山形県工業技術センター、山形県立産業技術短期大学校】

高耐熱球状黒鉛鑄鉄に必要な Si 量を明らかにした。

開発材料の機械的性質（常温、高温）、疲労特性（常温、高温）、熱疲労特性、鑄造時のひけ性を評価し、基礎的な特性を明らかにした。

試作したエキゾーストマニホールドについてヒートサイクル試験を実施し、実機での使用において十分な耐久性を有することを明らかにした。

(5) 異種金属接合

【担当機関：山形県工業技術センター、(株)ハラチュウ、日産ライトトラック(株)】

ファイバレーザ溶接を用いて高耐熱球状黒鉛鑄鉄とステンレス鋼との溶接を試み、良好に接合できることを明らかにした。

鑄鉄管とステンレス管を溶接接合したエキゾースト・マニホールドの製造方法を検討し、実用化可能であることを明らかにした。

1 - 4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人山形県産業技術振興機構 プロジェクト推進課 担当 木村 好宏

〒 990-2473 山形県山形市松栄 2 丁目 2 番 1 号

TEL 023-647-3163 FAX 023-647-3139

E-mail info@ypoint.jp

第2章 本論

2-1 球状黒鉛鑄鉄の黒鉛超微細化

(1) 基礎技術開発及び効果の検証

本研究では、鑄型内接種を効果的に利用した「改良2段接種」により組織の微細化を図ることとした。目標を直径25mmの丸棒試験片において黒鉛粒数1000個/mm²以上とした。また、実際の製品を鑄造するにあたっては、鑄鉄の肉厚（寸法）が超微細化の効果に与える影響を明らかにする必要もある。そのため、板状試験片を用いて肉厚感受性を検討することとし、板厚3mm部でチルが発生しないこと、板厚9mm部で黒鉛粒数1000個/mm²以上を目標として実験を行った。

供試材の目標組成を3.6C-2.8Si-0.1Mnとした。溶解には高周波溶解炉を用い、取鍋での1次接種及び図2-1-1に示す鑄型内接種用鑄型を用いた2次接種を実施した。

鑄型はノックオフKb型（直径25mm、シェル型）の他、縦60mm×横60mm×厚さ3mm及び9mmの板状試験片型（CO₂型）を用いた。板状試験片は、試験片中央部を用いて評価した。

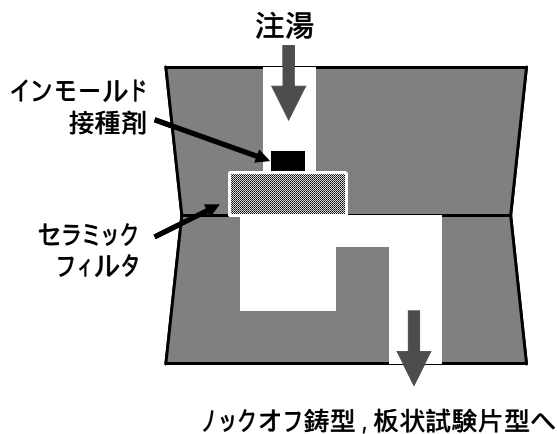
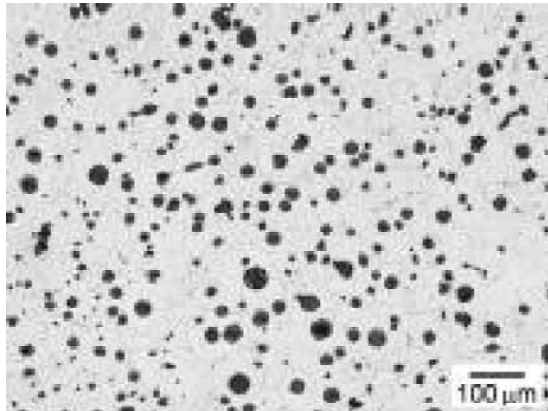


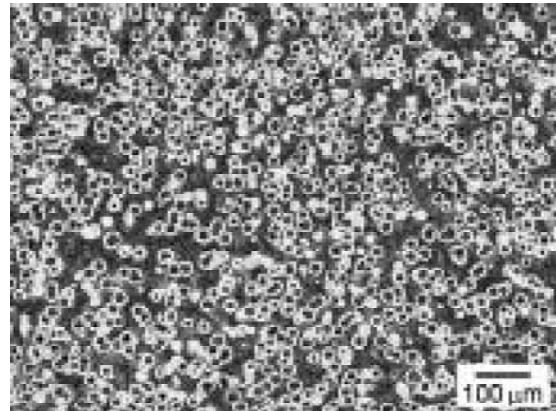
図 2-1-1 鑄型内接種用鑄型

鑄造した材料について、樹脂包埋・研磨・琢磨により観察試験片を作製した。金属顕微鏡による組織観察及び画像処理・解析・計測ソフトによる黒鉛粒数の計測を行った。

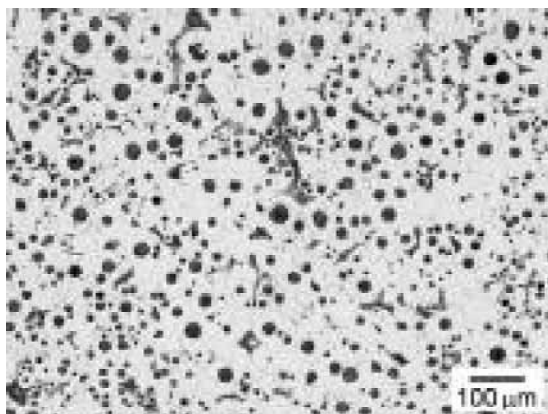
図2-1-2に直径25mmの丸棒、厚さ3及び9mmの板状試験片の組織写真を示す。直径25mmの丸棒では全フェライト組織となり、黒鉛粒数が約1000個/mm²であった。板厚3mm部では、フェライト-パーライトの混合組織となったが、チルは見られなかった。板厚9mm部では、フェライトを主として一部にパーライトが存在する組織で、黒鉛粒数は約1300個/mm²であった。以上の結果、当初の目標は達成された。



a. 丸棒試験片（直径 25mm）



b. 板状試験片（板厚 3mm）



c. 板状試験片（厚さ 9mm）

図 2-1-2 試験片の組織写真

(2) 効果の検証

開発した超微細化処理の手法を現場で適用するためには、接種効果の持続時間（フェーディング）が重要となる。そこで、改良 2 段接種を用いた現場での溶解試験により、超微細化効果（黒鉛粒数が 1000 個/mm^2 以上）の持続時間が 5 分以上であることを目標として研究を実施した。

実験には生産用溶解炉を用い、FCD400 ~ 450 相当の材料について実験を行った。溶解炉で所定の元湯成分となるように調整の後、球状化剤を配置した反応取鍋に出湯し、球状化反応終了から時間を計測しながら鑄型内接種剤を配置したノックオフ Kb 型に注湯した。

鑄造した丸棒を切り出し、研磨・琢磨により観察試験片を作製した。観察・撮影は金属顕微鏡により行った。また、画像処理・解析・計測ソフトにより黒鉛粒数の計測を行い、時間経過に対する微細化効果の持続性を評価した。

さらに、丸棒を加工して JIS 4 号引張試験片を作製し、引張強さ、伸び、ブリネル硬さを測定した。

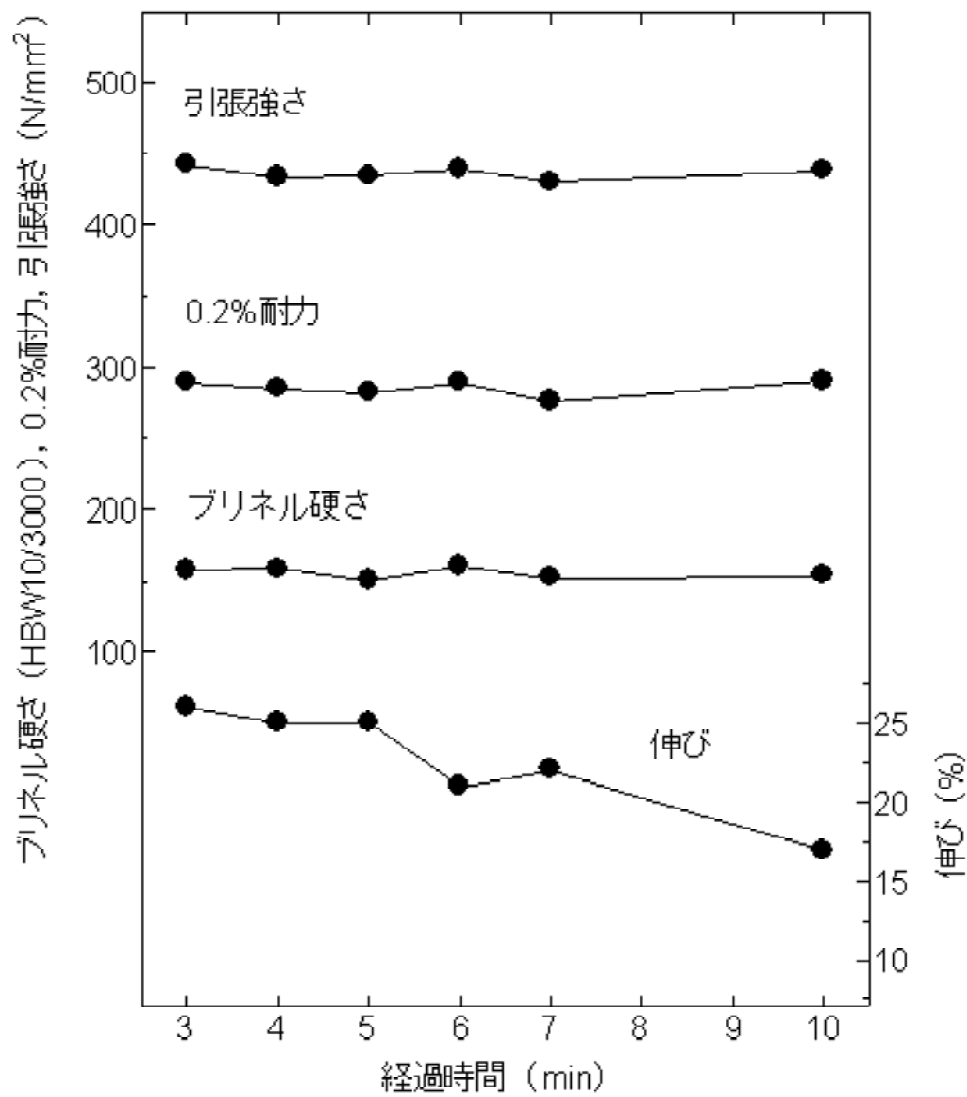
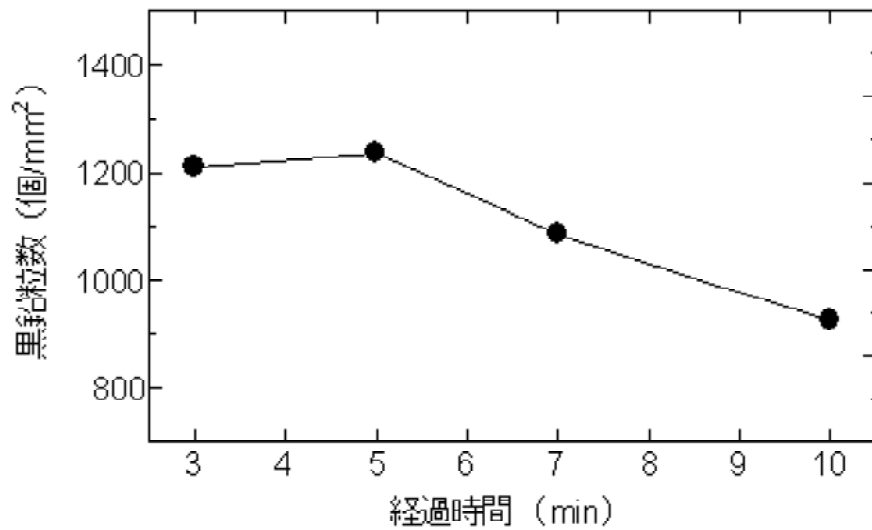


図 2-1-3 時間経過に伴う諸特性の変化

図 2-1-3 に時間経過に伴う黒鉛粒数、機械的性質の推移を示す。この結果、球状化処理後 7 分まで黒鉛粒数 1000 個/mm² 以上を維持しており、目標とした持続時間 5 分以上を達成することができた。また、機械的性質も経過時間にかかわらず一定であり、改良 2 段階接種は十分に適用できると考えられる。

(3) 新規鑄型内接種剤の開発と検証

接種で黒鉛粒数増加に効果が認められている元素として、昔から実績のある Ca、次に Al、Zr、Sr、Ba、RE、そして最も後から加わった Bi などがある。特に、Bi は黒鉛球状化阻害元素であるが、適切に使えば黒鉛粒数を著しく増加させる効果があることも知られている。

本研究では、Bi 含有鑄型内接種剤の開発を行い、その効果を検証した。

Bi 含有鑄型内接種剤の開発

開発する接種剤に求められる性能は、黒鉛粒数を増加させることだけでなく、以下の 3 つも満たすものでなくてはならない。

- 1) 溶湯との反応性が良いこと。
- 2) のろ発生が少ないこと。
- 3) 最終注湯流まで反応すること。

鑄型内接種法では、接種剤の表面酸化物や溶湯との反応時に生成する酸化物や溶湯との固溶度のない元素がのろとなって鑄物製品の内部や表面に巻き込まれる。これは鑄物の機械的性質を大きく低下させるので避けなければならないので、のろを作る元素を最小限におさえることとした。表 2-1-1 及び図 2-1-4 に開発した接種剤の成分と外観写真を示す。

表 2-1-1 鑄型内接種剤の化学成分

種類	Si	Ca	Al	Bi	Fe 他
Bi 含有(開発品)	75.4	0.90	2.24	0.90	Bal.
従来品	71.1	-	3.17	-	Bal.



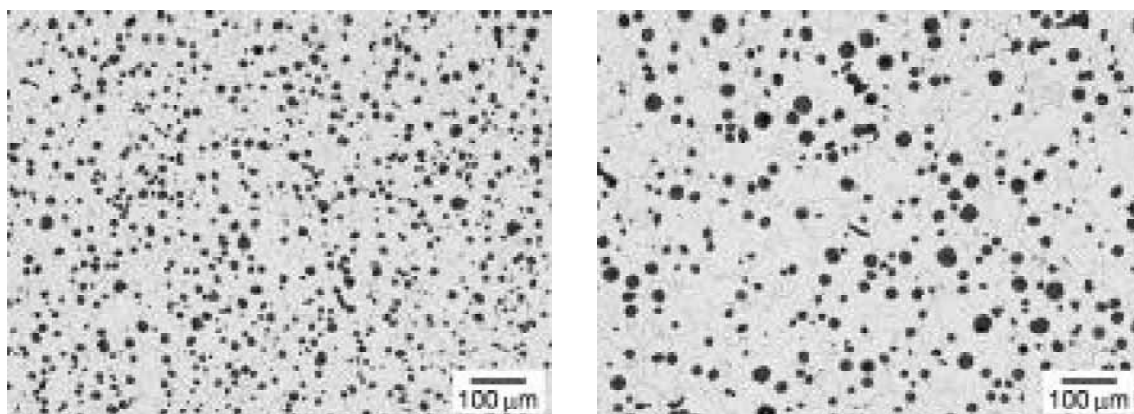
図 2-1-4 開発した Bi 含有鑄型内接種剤

Bi 含有鋳型内接種剤の効果の検証

先に表 2-1-1 に示した Bi 含有鋳型内接種剤（開発品）及び市販の鋳型内接種剤（従来品）を用いて超微細化の効果を比較した。

溶解には高周波溶解炉を用いた。目標組成を 3.6C-2.8Si-0.1Mn とし、反応するつばにより球状化処理を行った後、鋳型内接種用鋳型を配置したノックオフ Kb 型（直径 25mm）へ注湯した。

図 2-1-5 に採取試料の組織写真を示す。開発した Bi 含有鋳型内接種剤を用いた場合には黒鉛粒数が鋳型内接種剤を用いた場合の約 1.8 倍になり、黒鉛組織が大幅に微細化されることがわかった。Bi 含有鋳型内接種剤を用いた試料では、特に球状化不良も生じておらず、目的とする効果が達成された。



a. Bi 含有鋳型内接種剤（開発品）

b. 市販の鋳型内接種剤（従来品）

図 2-1-5 鋳型内接種剤の比較

2 - 2 球状黒鉛鋳鉄の延性・靱性の確保

(1) マンガン許容量の究明

改良 2 段接種により黒鉛組織を超微細化した高 Mn 球状黒鉛鋳鉄について実験室的な検討を行い、FCD450 及び 400 規格を満足するための許容 Mn 量を明らかにした。

そこで、現場における高 Mn 球状黒鉛鋳鉄の製造技術を確立することを目的に、生産設備を用いて Mn を 0.6% 含有した FCD450 相当材料及び Mn を 0.2% 含有した FCD400 相当材料の試作を行った。

目標組成を FCD450 相当材料では 3.6C-2.8Si-0.6Mn、FCD400 相当材料では 3.6C-2.6Si-0.2Mn とし、現場の低周波溶解炉（容量 6t）を用いて作製した。銑鉄、鋼材、戻り材等を溶解した後、炉内成分を発光分光分析装置により分析し、目標組成とするために必要な Fe-Si 及び Fe-Mn を添加した。容量 360kg の配湯（反応）取鍋で球状化処理後、配湯取鍋を注湯ラインに移動し、鋳型内接種用鋳型を配置したノックオフ Kb 型（直径 25mm）及び Y ブロック B 号型に注湯した。

試験の結果、0.6% の Mn を含む材料の機械的性質は引張強さが 490 ~ 500N/mm² 程度、伸びが 20% 程度となり、FCD450 の規格（引張強さ：450N/mm² 以上、伸び：10% 以上）を満

足ることがわかった。一方、0.2%の Mn を含む材料の機械的性質はいずれも引張強さが 430N/mm^2 程度、伸びが 25%弱となり、FCD400 の規格(引張強さ： 400N/mm^2 以上、伸び：15%以上)を満足することがわかった。さらに、シャルピー吸収エネルギーは室温で 14J となり、鑄放しでも FCD400-18 規格(引張強さ： 400N/mm^2 以上、伸び：18%以上、シャルピー吸収エネルギー：平均 14J 以上及び個々の値 11J 以上)を満足することがわかった。

以上により、当初の目標を達成することができた。

(2) 開発材料の物性評価

上記により開発した手法を用いて 0.6%の Mn を含有する FCD450 相当材料及び 0.2%の Mn を含有する FCD400 相当材料を量産し(各 $N=30$)、各種特性の評価を行った。

疲労特性

疲労試験は、フルデジタル油圧サーボ試験機を用いて、引張圧縮様式 ($R=-1$)、繰返し速度 15Hz で実施した。

開発した 0.6Mn-FCD450 及び FCD450 従来材料を比較した結果、開発材料はすべての応力振幅域で長寿命となった。開発材料の疲労限度は従来材料よりわずかであるが高くなった。しかし、疲労限度比(疲労限度/引張強さ)は開発材料(0.48)より従来材料(0.54)が若干高く、疲労強度の改善は大きくなかったといえる。

一方、開発した 0.2Mn-FCD400 及び FCD400 従来材料(焼なまし)を比較した結果、開発材料の方が長寿命となった。また、疲労限度も開発材料が従来材料よりも高くなった。疲労限度比(疲労限度/引張強さ)は開発材料(0.51)が従来材料(0.46)よりも高い値を示し、引張強さに依存しなくても疲労特性が改善したことがわかった。

機械加工性

一般に鑄鉄は鑄放しで使用されることは少なく、機械加工を行って使用される。したがって、材料を実用化するためには開発した材料の機械加工性を明らかにする必要がある。特に、機械加工の自動化によるコスト低減を図る上で、開発材の被削性が従来材と同等以上であることが望ましい。そこで、その評価手法として切削抵抗を測定することで従来材料と開発材料の被削性の比較を行った。

切削試験は図 2-2-1 に示す普通旋盤を用い、旋盤加工を行った。試料は $\phi 20\text{mm} \times 200\text{mm}$ の丸棒とした。切削抵抗は圧電式切削動力計を用い、主分力、背分力、送り分力の 3 成分について測定を行った。

測定の結果、0.6Mn-FCD450 では、従来材料に比べ主分力、送り分力、背分力ともに 20 ~ 30 %ほど小さくなった。これにより、切削性が向上していることがわかった。一方、0.2Mn-FCD450 では主分力、送り分力、背分力ともに従来材料より若干下回ったことから、切削性は従来材料と同等以上であることがわかった。

(3) 実体特性の評価方法の検討

2 - 3 (3)にまとめて記載した。

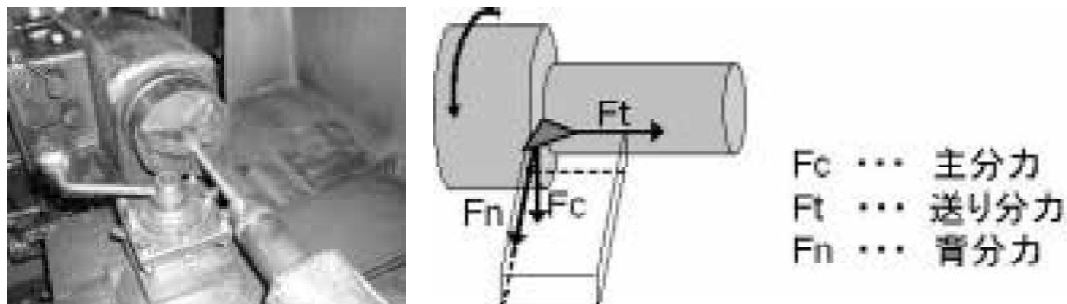


図 2-2-1 普通旋盤及び測定した切削抵抗力

2 - 3 球状黒鉛鑄鉄の剛性・耐摩耗性の向上

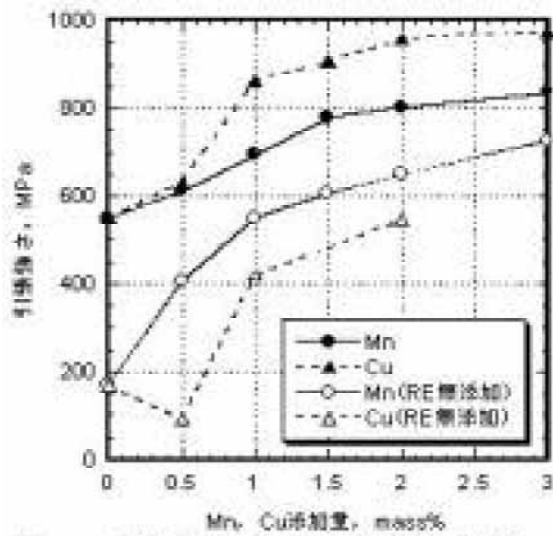
(1) 合金元素許容量の究明

高純度銑鉄(4.24%C、0.07%Si、0.09%Mn、0.022%P、0.006%S)、電解鉄、Fe-Si、Fe-Mn、Fe-S 及び純 Cu を用い、10kHz、20kW の高周波誘導炉によりアルミナライニングを施した 6 番黒鉛るつぼ中で、1 回の溶解量を 3kg として溶解した。最終目標組成を 3.8%C、2.8%Si、0.09 ~ 3.0%Mn、0.02%P、0.05%S、0 ~ 3.0%Cu とした。溶湯温度 1773K で Fe-Si-Mg(8.20%Mg) 合金 1.6%を溶湯中にサンドイッチ法で添加して球状化处理を行った。RE 添加には RE (31.7%)-Si(34.9%)合金(RE の主たる成分は 44.6%Ce、26.2%La)を用い、球状化处理時に目標値 0.20%RE となるように添加した。また、比較のために RE 無添加の試料も作製した。反応終了後 Fe-Si を 0.4%接種し、1673K で 30mm × 150mm のノックオフタイプのシェル型に注湯した。本試料から引張試験片(JIS 4号試験片)を加工して引張試験を行い、引張強さ及び伸びを測定した。また引張試験片の破断面近傍よりブリネル硬さを測定した。

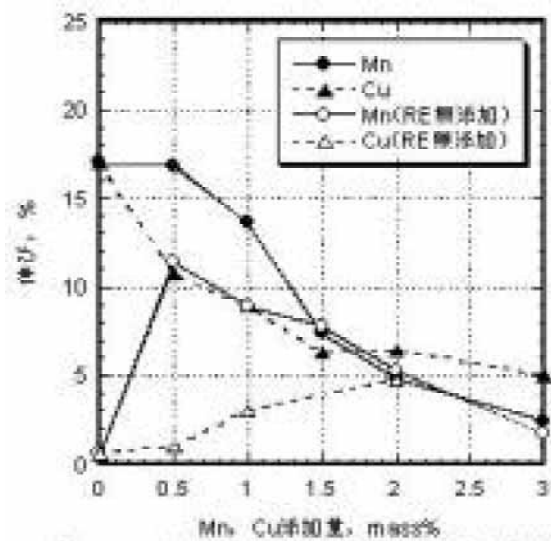
図 2-3-1(a)に引張強さと Mn、Cu 添加量との関係を示す。RE 添加した試料は RE 無添加の試料と比較し、いずれの Mn、Cu 添加量でも高い引張強さを示した。RE 添加した試料に着目すると、Mn、Cu 添加量の増加に伴い引張強さは上昇し、Mn 添加量が 1.5%で 700N/mm² を超え、Cu 添加量が 1.0%で 800N/mm² を超えた。さらに、Cu 添加量を 1.5%以上にすると 900N/mm² を超え、JIS 規格の FCD800-2 より高強度な球状黒鉛鑄鉄を鑄放して製造することが可能である。また、Cu 添加した試料では Mn 添加した試料と比較して、より低い添加量で高強度となることがわかった。

図 2-3-1(b)に伸びと Mn、Cu 添加量との関係を示す。RE 無添加の試料では RE 添加した試料と比較すると伸びが小さい傾向を示した。一方、RE 添加した試料に着目すると、Mn、Cu 添加量の増加に伴い伸びは低下し、引張強さの結果と良く対応している。

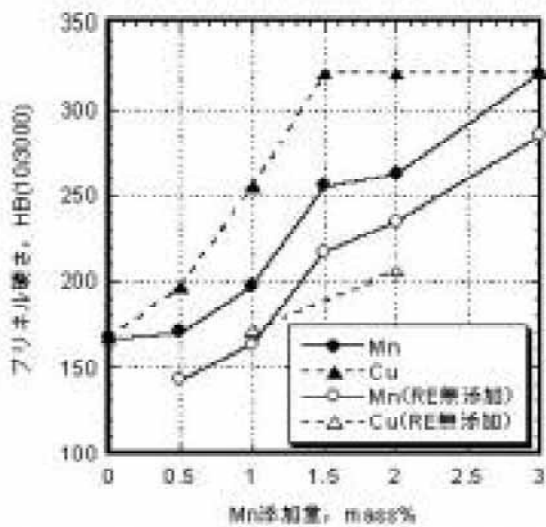
図 2-3-1(c)にブリネル硬さと Mn、Cu 添加量との関係を示す。RE 添加した試料は RE 無添加の試料と比較し、いずれの Mn、Cu 添加量でも高いブリネル硬さを示した。一方、RE 添加した試料に着目すると、Mn 添加した試料では Mn 添加量の増加に伴いブリネル硬さも上昇したが、Cu 添加した試料では Cu1.5%以上添加してもブリネル硬さの上昇は認められなかった。



(a) 引張強さ



(b) 伸び



(c) ブリネル硬さ

図 2-3-1 開発材料の機械的特性

以上の結果より、 900N/mm^2 以上の引張強さを示す球状黒鉛鑄鉄の製造が鑄放しで可能であることがわかった。

(2) 開発材料の物性評価

2 - 3 (1)で開発した高強度・耐摩耗球状黒鉛鑄鉄について試験片を量産し (N=30)、各種特性評価を行った。

機械的性質

開発材料の機械的性質は引張強さが約 900N/mm^2 、ブリネル硬さが約 300HBW であり、従来の FCD800 (焼ならし、引張強さ $800 \sim 850\text{N/mm}^2$ 、硬さ 300HBW) と同等以上の特性が鑄放しで得られた。

機械加工性

機械加工性の評価は、開発材料及び熱処理（焼ならし）を行った全パーライト球状黒鉛鋳鉄（従来材料）について実施した。

切削抵抗を測定した結果、いずれの材料でも背分力はほとんど変わらなかったが、主分力、送り分力に関しては開発材料の方が小さくなった。切り屑の形状を調べた結果、従来材料は流れ形の切り屑になったが、開発材料はともにせん断形切り屑となった。以上の結果より、開発材料は従来全パーライト系材料と同等以上の機械加工性を有することがわかった。

疲労特性

疲労試験は、開発材料及び熱処理（焼ならし）を行った全パーライト球状黒鉛鋳鉄（従来材料）について実施した。

試験の結果、従来材料と比較して開発材料の疲労限度は約 10 %高くなった。また、疲労限度比は従来材料が 0.29、開発材料は 0.43 となり、開発材料の疲労特性が良好であることが明らかとなった。

耐摩耗性

耐摩耗性の評価は、開発材料及び熱処理（焼ならし）を行った全パーライト球状黒鉛鋳鉄（従来材料）について実施した。

本研究で使用した摩耗試験機は、ボールオンディスク型高温摩耗試験機である。試験片は 30mm の円柱状の試験片を厚さ 5mm に切断しディスク状にしたものを平面研削し、エメリー紙で研磨したあとアセトンで脱脂を行ってから使用した。相手材ボールには高硬度で耐摩耗性に優れるアルミナボール(直径 6mm、約 1400HV)を使用した。これは、一般に金属を相手材とした場合、相手材の変化も摩耗挙動に反映されるため相手材側の影響を排除することおよびアプレシブ摩耗の評価もある程度できるためである。

摩耗の評価は、試験前後の質量減少量が電子天秤の秤量限界を超えるほど少なかったため、表面粗さ計による摩耗痕形状の 2 次元断面プロファイルから体積を求め、密度を掛けることで質量減少量を求めた。

試験の結果、従来材料と開発材料は機械的性質及び組織に大きな違いがなかったが、摩耗量はすべての条件で開発材料の方が少なくなった。すべり速度の変化に注目すると開発材料はすべり速度が変化しても摩耗量の変化はほとんどないが、従来材料は荷重 5N 以外では速度の増加とともに摩耗量が増加した。一方、荷重の変化に注目すると、従来材料で荷重の増加とともに摩耗量も増加する傾向を示した。

(3)実体特性の評価方法の検討

鋳造品の実体特性（強度）を簡便に評価する手法として、簡易硬さ計によるブリネル硬さ及び超音波伝播速度測定器による材料の音速を測定し、ブリネル硬さ及び音速と引張強さとの関係調べた。

実験では、FCD400 ~ 800 相当の試験片約 300 点について、引張強さ、ブリネル硬さ、音速を調べた結果、良好な相関を有する関係式 ($r^2=0.95$) が得られた。

2 - 4 球状黒鉛鑄鉄の耐熱性の向上

(1)最終 Si 量の究明

本研究で開発の対象としているエキゾーストマニホールドの耐熱性は、材料の相変態による熱疲労の影響が最も大きい。したがって、耐熱温度 930 を達成するためには変態点が 930 以上となる必要がある。そこで、熱膨張計 (TMA) により Si 量と変態点の関係を調べ、必要となる最終 Si 量を検討した。

図 2-4-1 に、5.0%Si 材料の TMA 曲線を示す。図より、918 付近に変曲点があり、これが変態点であることを示している。同様の曲線を各 Si 量について調べ、得られた変態点との関係を図 2-4-2 に示す。図より、Si 量の増加に伴い変態点が上昇し、耐熱温度を 930 以上とするためには、5.3%以上の Si が必要であることがわかった。

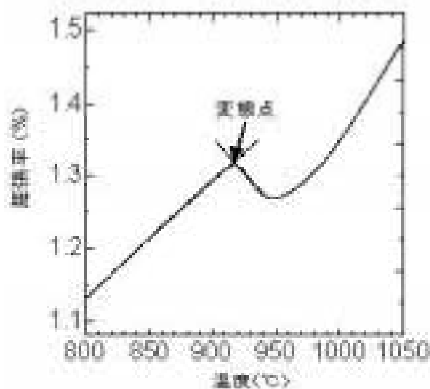


図 2-4-1 5.0Si 材の TMA 曲線

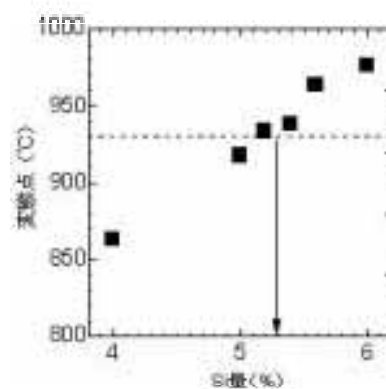


図 2-4-2 Si 量と変態点の関係

(2)開発材料の物性評価

2 - 4 (1)において開発した材料について試験片を量産し (N=30)、各種特性評価を行った。

機械的性質

採取した試験片の常温での機械的性質を以下に示す。

- ・引張強さ 736N/mm²
- ・伸び 17%

機械加工性

機械加工性評価は、開発した 5.3%Si 材料及び従来材料 (4.0%Si) について実施した。

切削抵抗を測定した結果、従来材料に比べ開発材料が 3 分力 (主分力、背分力、送り分力) とともに 30 ~ 40 %ほど大きくなり、切削抵抗が高くなることがわかった。これは、Si 量の増加に伴い、材料が硬くなったことが影響していると考えられる。切り屑は比較的長くつながっていたが適度に切断されており、工具に巻き付くなどの問題は生じなかった。このことから、切削性に問題はないと考えられる。

疲労特性

機械加工性評価は、開発した 5.3%Si 材料及び従来材料 (4.0%Si) について実施した。この結果、5.3%Si 材料の疲労寿命は全応力振幅で長寿命となった。疲労限度も従来の 4.0%Si 材料と比較して 5.3%Si 材料は約 40%高くなっていることがわかった。また、疲労限度比においても、5.3%Si 材料 (0.46) が 4.0%Si 材料 (0.4) を上回った。この結果から、5.3%Si 材料は Si 添加による引張強さの上昇分以上に疲労強度が改善されたと思われる。

高温物性

開発材の高温での特性評価として、開発した 5.3%Si 材料及び従来材料 (5.0%Si、4.0%Si) について酸化試験を行った。試験片は直径 10mm、厚さ 1mm の円板とし、Ar-O₂ 雰囲気、950 で 24h 保持したときの表面積あたり重量変化 (酸化増量) を評価した。

試験の結果、Si 量が増すと酸化増量も小さくなり、開発した 5.3%Si 材料が最小となった。静的な酸化については従来材料でも性能は十分とされており、開発材料はこれを上回ることから、耐酸化性は極めて良好であるといえる。

(3) 開発材料の試作、評価

開発材の総合的な耐久性評価を目的として、エキゾーストマニホールド (以下エキマニ) を試作し、実機エンジンの熱負荷を再現するヒートサイクル試験機を用いてその耐久性評価を行った。

ヒートサイクル試験はエキマニを実機同様の拘束状態にし、LPG バーナー炎による管内の加熱及び送風による冷却を繰り返すを行い、熱応力による変形の程度からその耐久性を簡易的に評価する試験である。特にエキマニが取付けボルトに干渉する程大きく変形した場合、亀裂等で部品機能を損なう危険性があるため、熱応力による変形挙動を把握することが重要である。

評価は試験前の形状と試験加熱時の形状とを比較し、変位量を測定することで行った。試験結果として、エキマニ表面の代表的な箇所 (X1 ~ 7、Y1 ~ 5、Z1 ~ 6) を設定し、各箇所の加熱時の変位 (図 2-4-3) が得られた。これらの結果から加熱時、試験後共にエキマニの変形は取付けボルトに干渉しない範囲であることを確認できた。また外観観察及びカラーチェックを行いエキマニに亀裂等の異常が無いことを確認した。

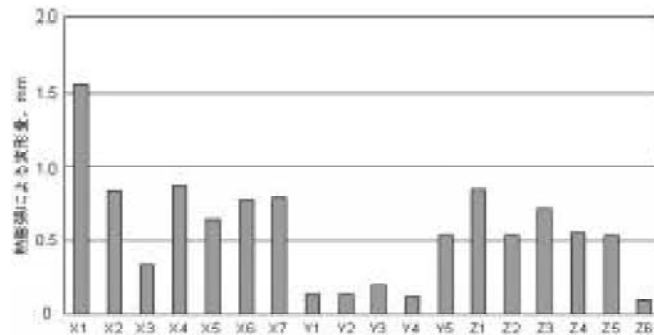


図 2-4-3 加熱時の寸法変化

2 - 5 異種金属接合

(1) 溶接条件の検討

ファイバーレーザー溶接による基本的な溶接性を検討するため、板厚 6mm の高けい素球状黒鉛鋳鉄板とオーステナイト系ステンレス鋼板 (SUS304) との突き合わせ溶接を行った。

実験の結果、設定したいずれの溶接条件でも裏面まで溶け込むことがわかった。また先に実施したビードオンプレート試験で見られたビード表面の微細な割れは、すべての試験片で見られなかった。

(2) 試作、評価

今回の研究テーマの最終的な目標は、エキゾーストマニホールドの製造技術に応用することである。マニホールドは図 2-5-1 に示すように円筒形状で、鋳鉄製のマニホールドとステンレス製のベローズを重ね溶接する構造となる。そこで、より実際の製品に近い条件で実験するため、継手の形状を突合せ形状から重ね継手形状に変更してレーザー溶接を行った。

図 2-5-2 に溶接部のマクロ写真を示す。図より鋳鉄内部まで溶け込んでおり、良好に接合されていることがわかった。

今後、溶接条件を細かく設定し溶接欠陥等を少なくすることで、排気系自動車部品としての性能を満足する製品を製造することが可能であると考えられる。

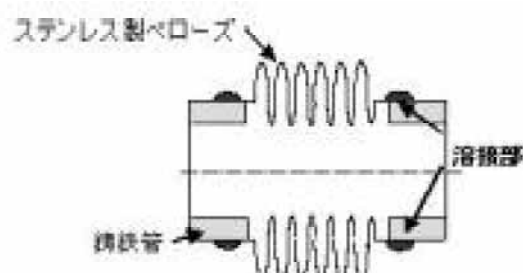


図 2-5-1 鋳鉄-ステンレス鋼一体型マニホールドの溶接部断面概要図



図 2-5-2 重ね継手の溶接部マクロ写真

第3章 総括

本研究では、球状黒鉛鑄鉄中の黒鉛を「より細かく、より多く、より均一に」晶出させる技術を基本とし、これに合金元素を効果的に添加することで、鑄鉄の剛性や靱性の向上、耐摩耗性の向上及び耐熱性の向上を低コストで実現することを目的した。

本研究は平成20～22年度の3ヶ年にわたり実施した。平成20～21年度には、黒鉛組織を超微細化するための手法である「改良2段接種」について実験室的な検討及び現場への適用実験を実施し、鑄鉄の特性向上に向けた基礎技術を確立することができた。これを受け、平成21年度を中心に具体的な特性向上を目指した合金元素添加実験を実施し、平成21～22年度には開発した材料の特性評価を実施した。多方面からの評価により開発材料が当初の目標に対して十分な特性を持つことが明らかとなったため、平成22年度には実際の製品を試作し、試作品の評価を行った。

以上のとおり、基礎技術の開発から現場への応用、製品の試作まで、順調に研究が進捗したと考えている。

本研究では、第1章でも記したとおり下記の部材の高度化を目指した。

耐摩耗性や剛性に優れた輸送機械・建設機械用鑄鉄部材

延性や靱性に優れた輸送機械用鑄鉄部材

耐熱性に優れた輸送機械用鑄鉄部材

いずれも川下企業のニーズによるものであり、本研究は川下企業から具体的な性能の提示や試作品の性能評価といった多くの協力を得ながら実施した。本研究で得られた成果はいずれも目標とする性能を満足するものであったが、製品の量産に向けてはコスト低減のための製法・材質（性能）の最適化が必要であることも明らかになっている。

したがって、今後とも補完研究を継続し、事業化に向けた取り組みを川上・川下企業が一体となって実施する予定である。

【専門用語等の解説】

- 1 チル
凝固過程で生成する炭化物を含むきわめて硬く脆い組織で、鑄鉄の典型的な不良組織。
- 2 接種
黒鉛晶出の核となる物質を添加する処理。チル防止にも効果がある。
- 3 肉厚感受性
肉厚によって特性が変化すること。
- 4 フェーディング
接種効果が時間とともに失われていくこと。
- 5 溶湯
溶融状態の金属。
- 6 元湯
接種処理を施す前の溶解炉中の溶湯。
- 7 注湯
溶湯を鑄型に注ぐこと。
- 8 機械的性質
引張特性、圧縮特性、曲げ特性、硬さ等の総称
- 9 希土類元素 (RE)
原子番号 21 番のスカンジウム (Sc) 39 番のイットリウム (Y) 及び 57 番のランタン (La) から 71 番のルテチウム (Lu) までの元素の総称。全 17 元素。
- 10 フェライト
鉄系材料の結晶構造の一つで、ほぼ純鉄である。軟らかく靱性や延性に優れている。
- 11 パーライト
フェライトと炭化物 (Fe_3C) が層状に重なった組織で、強靱な特性を発揮する。
- 12 オーステナイト
鉄系材料の結晶構造の一つであるが、通常の鑄鉄では高温領域でしか存在しない。
- 13 鑄放し
鑄造したままの状態。
- 14 焼きなまし処理
高温 (オーステナイト領域) から炉冷する熱処理。フェライト組織を得たいときに施される。
- 15 焼きならし処理
高温 (オーステナイト領域) から空冷する熱処理。パーライト組織を得たいときに施される。
- 16 ブラケット
自動車の各部品を取り付けるための基部。取り付け金具。
- 17 プーリ
ベルトを介してエンジンの回転力を他の部品に伝達するための部材。
- 18 エキゾースト・マニホールド
自動車エンジンの燃焼ガスを集合する部材。高温に曝される。
- 19 レーザ溶接
レーザ光を熱源として主として金属に集光した状態で照射し、金属を局部的に溶融・凝固させることによって接合する方法のこと。従来の溶接法に比較して高速深溶込み溶接が可能、溶接熱影響が非常に少ない、溶接変形が少ない等の大きな特長がある。