

<b>氏 名</b>	なす しゅうさく <b>那須 秀策</b>
本籍（国籍）	岩手県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第292号
学位授与年月日	平成31年3月22日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科フロンティア物質機能工学専攻
<b>学位論文 題目</b>	<b>高耐熱特性を有するフェライト系鋳鉄の研究</b>
学位審査委員	主査 教授 平塚貞人 副査 教授 水本将之 副査 教授 廣瀬宏一

## 論文内容の要旨

本論文では、エンジン用排気系部品を想定したフェライト系鋳鉄材料の高温特性が、黒鉛形態や含有する元素によってどのように影響するのかを検討した。

以下に各章の総括を示す。

第1章「序論」では、本研究の社会的背景として、排ガス規制及び自動車メーカーの取り組み状況や課題を述べた。排気系部品材料の高温特性向上のニーズに対して、本研究の目的と構成と方針について述べた。

第2章「従来の研究」では、本研究に関わる従来の研究について、片状黒鉛鋳鉄、球状黒鉛鋳鉄などの開発の歴史や定義及び分類、特性、用途など鋳鉄全般について記述した。次に、排気系部品が使用される環境から材料として求められる特性と研究事例についての調査結果を記述した。これらの検討と従来の研究報告を系統的に調査し、本研究の課題を解決するアプローチ方法を明示した。

第3章「鋳鉄の高温特性に及ぼす黒鉛形態の影響」では、フェライト基地の片状黒鉛鋳鉄(FC)、芋虫状黒鉛鋳鉄(FCV)、球状黒鉛鋳鉄(FCD)を溶製し、黒鉛球状化率の異なる鋳鉄の高温特性を評価した。室温の機械的性質はFC<FCV<FCDの順に高強度、高延性になった。この傾向は673Kの引張試験においても同様であったが、1073Kの強度については、FCが最も低強度で、FCV、FCDには顕著な差は見られなかった。耐酸化性と耐熱疲労性は、FCDが最も長寿命であった。高温特性に優れる黒鉛形態は球状黒鉛である事が明らかとなった。

第4章「球状黒鉛鋳鉄の高温特性に及ぼす添加元素の影響」では、Si、Cr、Mo、V、P量を変化させた球状黒鉛鋳鉄を溶製し、各種元素量が高温特性に及ぼす影響について調べた。SiはFeへの固溶強化作用により含有量増加で引張強さや硬さを上昇させ、伸びを低下させた。しかし、高温(特に973~1073K)ではSi量増加で強

度が低下した。Cr は Fe への固溶強化作用は小さいものの、耐酸化性を向上させる元素であり、熱疲労寿命も向上させている。Mo は炭化物を形成し、析出強化の面で作用しているので、含有量増加で強度、硬さは上昇し、伸びは低下した。耐酸化性を悪化させる元素であり、熱疲労寿命も短寿命化させた。V も Mo 同様に強度を向上させる元素であるが、耐酸化性を悪化させる元素でもあり、熱疲労寿命向上効果も見られなかった。P は 673K の伸び向上に寄与し、中間温度域の伸びの確保によって、特にひずみが高い場合の耐熱疲労性を改善する事が明らかになった。

第 5 章「球状黒鉛鋳鉄の高温特性に及ぼす含有元素複合の影響」では、高 Si 組成をベースに Cr、Mo、V 含有量を複合的に変化させた材料の特性を調査した。耐熱疲労性を向上させるには Si、Cr の併用が有効であることが明らかとなった。また、高 Si に設定する事で Mo、V の高温強度向上効果を持ちつつ、耐酸化性、耐熱疲労性もある程度良好となることが明らかになった。

第 6 章「高温特性改善材の鋳造性、被削性」では、鋳鉄製品を量産する上で重要な鋳造性(引け性)及び被削性を評価した。高温特性が向上した材料は、強化型元素が多く含有するため生産性は悪化するが、引け性に関しては鋳造方案や接種の最適化で改善され、被削性に関しては加工条件の見直しで改善される可能性があることが明らかになった。

第 7 章「鋳鉄の疲労強度に及ぼす表面状態の影響」では、片状黒鉛鋳鉄及び球状黒鉛鋳鉄を溶製し、各種表面状態及び金属組織にて疲労強度を評価した。片状黒鉛鋳鉄では黒鉛径(共晶セル径)が鋳肌の粗さ、凹凸よりも大きいため影響がない事が明らかとなった。球状黒鉛鋳鉄では、黒鉛径が小さいため、表面粗さの影響が顕著に現れた。表面をショットブラスト処理すると表層に発生した圧縮応力によって疲労強度は向上することが明らかとなった。

第 8 章では第 2 章から第 7 章までの結論を総括し、本論文の目的に対する結論を述べた。エンジン用排気系部品であるフェライト系鋳鉄材料の高温特性向上には、高温、酸化、拘束環境に対する耐酸化性、耐熱変形性、耐熱疲労性の向上が複合的に必要であること、さらに黒鉛形態、含有する元素や表面状態が影響することが明らかになった。

## 論文審査結果の要旨

本論文では、エンジン用排気系部品を想定したフェライト系鋳鉄材料の高温特性が、黒鉛形態や含有する元素によってどのように影響するのかを検討している。

第 1 章「序論」では、本研究の社会的背景として、排ガス規制及び自動車メーカーの取り組み状況や課題を述べている。排気系部品材料の高温特性向上のニーズに対して、本研究の目的と構成と方針について述べている。

第 2 章「従来の研究」では、本研究に関わる従来の研究について、片状黒鉛鋳鉄、球状黒鉛鋳鉄などの開発の歴史や定義及び分類、特性、用途など鋳鉄全般に

ついて記述している。次に、排気系部品が使用される環境から材料として求められる特性と研究事例についての調査結果を記述している。これらの検討と従来の研究報告を系統的に調査し、本研究の課題を解決するアプローチ方法を明示している。

第3章「鑄鉄の高温特性に及ぼす黒鉛形態の影響」では、フェライト基地の片状黒鉛鑄鉄(FC)、芋虫状黒鉛鑄鉄(FCV)、球状黒鉛鑄鉄(FCD)を溶製し、黒鉛球状化率の異なる鑄鉄の高温特性を評価している。室温の機械的性質は  $FC < FCV < FCD$  の順に高強度、高延性になった。この傾向は673Kの引張試験においても同様であったが、1073Kの強度については、FCが最も低強度で、FCV、FCDには顕著な差は見られなかった。耐酸化性と耐熱疲労性は、FCDが最も長寿命であった。高温特性に優れる黒鉛形態は球状黒鉛である事を明らかにしている。

第4章「球状黒鉛鑄鉄の高温特性に及ぼす添加元素の影響」では、Si、Cr、Mo、V、P量を変化させた球状黒鉛鑄鉄を溶製し、各種元素量が高温特性に及ぼす影響について調べている。SiはFeへの固溶強化作用により含有量増加で引張強さや硬さを上昇させ、伸びを低下させた。しかし、高温(特に973~1073K)ではSi量増加で強度が低下した。CrはFeへの固溶強化作用は小さいものの、耐酸化性を向上させる元素であり、熱疲労寿命も向上させている。Moは炭化物を形成し、析出強化の面で作用しているので、含有量増加で強度、硬さは上昇し、伸びは低下した。耐酸化性を悪化させる元素であり、熱疲労寿命も短寿命化させた。VもMo同様に強度を向上させる元素であるが、耐酸化性を悪化させる元素でもあり、熱疲労寿命向上効果も見られなかった。Pは673Kの伸び向上に寄与し、中間温度域の伸びの確保によって、特にひずみが高い場合の耐熱疲労性を改善する事を明らかにしている。

第5章「球状黒鉛鑄鉄の高温特性に及ぼす含有元素複合の影響」では、高Si組成をベースにCr、Mo、V含有量を複合的に変化させた材料の特性を調査している。耐熱疲労性を向上させるにはSi、Crの併用が有効であることが明らかにしている。また、高Siに設定する事でMo、Vの高温強度向上効果を持ちつつ、耐酸化性、耐熱疲労性もある程度良好となることを明らかにしている。

第6章「高温特性改善材の鑄造性、被削性」では、鑄鉄製品を量産する上で重要な鑄造性(引け性)及び被削性を評価している。高温特性が向上した材料は、強化型元素が多く含有するため生産性は悪化するが、引け性に関しては鑄造方や接種の最適化で改善され、被削性に関しては加工条件の見直しで改善される可能性があることを明らかにしている。

第7章「鑄鉄の疲労強度に及ぼす表面状態の影響」では、片状黒鉛鑄鉄及び球状黒鉛鑄鉄を溶製し、各種表面状態及び金属組織にて疲労強度を評価している。片状黒鉛鑄鉄では黒鉛径(共晶セル径)が鑄肌の粗さ、凹凸よりも大きいため影響がない事を明らかにしている。球状黒鉛鑄鉄では、黒鉛径が小さいため、表面粗さの影響が顕著に現れた。表面をショットブラスト処理すると表層に発生した圧

縮応力によって疲労強度は向上することを明らかにしている。

第 8 章では第 2 章から第 7 章までの結論を総括し、本論文の目的に対する結論を述べている。エンジン用排気系部品であるフェライト系鋳鉄材料の高温特性向上には、高温、酸化、拘束環境に対する耐酸化性、耐熱変形性、耐熱疲労性の向上が複合的に必要であること、さらに黒鉛形態、含有する元素や表面状態が影響することを明らかにしている。

以上のように、本論文では、エンジン用排気系部品であるフェライト系鋳鉄材料の高温特性向上の方法を確立したもので、その工学的意義が極めて大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

### 原著論文名（3編）

1. Effect of Casting Skin Condition on Fatigue Strength of Gray Cast Iron, Shusaku Nasu, Satoshi Fujita, Noriaki Furusato, Satoru Yamada and Sadato Hiratsuka: International Journal of Metalcasting, Vol.11, pp155-161, 2017 年 1 月
2. 鋳鉄の熱疲労特性に及ぼす黒鉛形態の影響, 那須秀策, 趙 柏榮, 平塚貞人, 鋳造工学, 90 巻 7 号, pp359-366, 2018 年 7 月
3. 球状黒鉛鋳鉄の熱疲労特性に及ぼす Si, Cr の影響, 那須秀策, 趙 柏榮, 平塚貞人, 鋳造工学 90 巻 9 号, pp501-507, 2018 年 9 月