

高強度・高延性球状黒鉛鑄鉄の 引張，伸び特性と組織制御

趙 柏 榮* 鈴木 進 補**
中 江 秀 雄***

1. はじめに

近年，気候の温暖化傾向やエルニーニョ現象などに象徴される異常気象など，地球規模の環境問題は悪化の一途を辿っている．その原因の一つは温室効果をもたらすCO₂ガスの排出とされている．自動車産業でのCO₂ガス低減は，車両軽量化による自動車の燃費改善が，また，トラックでは車両重量を軽減できれば積載量を増加させることができ，結果としてCO₂の削減に貢献することになる．

車両の軽量化は車体側重量(ばね上)と車輪側重量(ばね下)，すなわち足回り部品の軽量化が必要とされ，ばね下重量の軽量化は操縦安定性や乗り心地の向上にも繋がるメリットがあることから，より重要とされている⁽¹⁾⁽²⁾．

軽量化を目的として，比重の軽いアルミニウムやマグネシウム合金などへの材料置換が進んでいる．しかし，製品形状の自由度が高く，材料及び製造コストが安いという観点から，足回り鑄物部品においては，鑄鉄材は強度面や設計的な工夫などでアルミ化より有利とされている⁽³⁾．

足回り部品の現行材質は，強度，靱性，生産性，コスト等に優れた球状黒鉛鑄鉄材(FCD材)が多く使用されている．この部材で新材料開発による軽量化が行えれば，その効果は大きい．

足回り部品の軽量化の多くは薄肉化設計により行われる．一方で，材料としては単に高強度化のみならず，衝突時安全性の観点から高い延性(伸びで10%以上)を同時に兼ね備える，いわば高強度・高延性FCD材が求められている．

本稿では組織制御による足回り部品で高強度・高延性

FCD材を得る手法について最近の研究開発成果を基に紹介する．

2. 高強度・高延性球状黒鉛鑄鉄の特性と組織制御

球状黒鉛鑄鉄⁽⁴⁾⁽⁵⁾とは，鑄鉄溶湯に適切な処理を行い，黒鉛を球状化させた鑄鉄を指す．基本的には，ねずみ鑄鉄となるべき溶湯にMg, Ca, Ceなどの黒鉛球状化元素，またはこれらを含む合金を添加し，フェロシリコンやカルシウムシリコンなどで接種を行い，鑄放して球状黒鉛を晶出させた鑄鉄である．球状黒鉛鑄鉄(Spheroidal graphite cast iron)は，ダクタイル鑄鉄(Ductile cast iron)，または，ノジュール鑄鉄(Nodular cast iron)と呼ばれることもある．鑄鉄の黒鉛形状は図1⁽⁶⁾のように分類されており，形態Iが片状，形態VIが球状黒鉛に相当する．

球状黒鉛鑄鉄は，片状黒鉛鑄鉄における機械的性質の弱点を補い，高強度と高延性をあわせ持つ以外にも，切削性，鑄造性，耐摩耗性などに優れる長所を持つことが広く知られている．その用途は，主として自動車の足回り部品やクランクシャフト，サスペンション部品などの自動車部品や鑄鉄管，建設機械など各種産業機械部品など多岐に渡る⁽⁷⁾⁽⁸⁾．

(1) 球状黒鉛鑄鉄の特性と成分，組織及び鑄物肉厚の関係

球状黒鉛鑄鉄は発明以来，多くの研究及び安定製造法の追求により，鋼に匹敵する強度特性が得られている．球状黒鉛鑄鉄の引張強さ，耐力，伸びはJIS G 5502, 5503, 5504⁽⁹⁾によって規定されている．なお，この他にも合金鑄鉄や鑄鉄管に関しては別の規格がある．

* 株式会社アイメタルテクノロジー研究開発部グループリーダー(〒300-0015 土浦市北神立町 4-2)

** 早稲田大学高等研究所; 准教授 *** 早稲田大学; 名誉教授

Development of Spheroidal Graphite Cast Iron with High Strength and High Elongation by Structure Control; Bairong Zhao*, Shinsuke Suzuki**, Hideo Nakae*** (*I Metal Technology Co., Ltd., Tsuchiura. **Waseda Institute for Advanced Study, Tokyo. ***Professor Emeritus Waseda University, Tokyo)

Keywords: *spheroidal graphite cast iron, strength and elongation, structure control, as cast, heat treatment, matrix structure lamellar and granular, pearlite morphology*

2012年9月10日受理

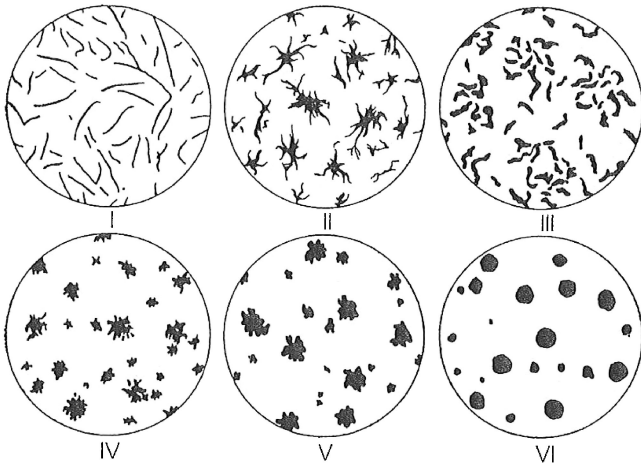


図1 黒鉛粒の形状分類図⁽⁶⁾ (JIS G 5502-2001).

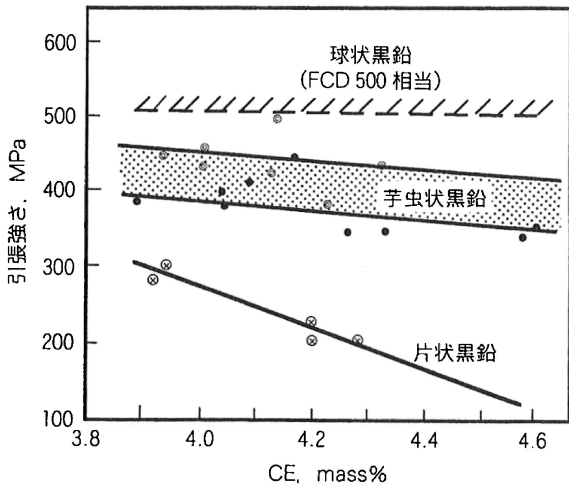


図2 各種铸铁の機械的性質とCE値の関係⁽¹⁰⁾.

片状黒鉛铸铁の強さはCE値(CE値は炭素当量といい、シリコンなどの合金元素の黒鉛化能力を炭素量に換算した値である。CE% = C% + 1/3(Si+P)%)に強く依存するが、球状黒鉛铸铁の強さはCE値に依存せず、CV(芋虫状)黒鉛铸铁は両者の中間となること、図2⁽¹⁰⁾のように示している。これらの結果は、鋼の基地に球状黒鉛が体積率で10%程度分散している材料が球状黒鉛铸铁であると考え、良く理解できる。すなわち、10%の黒鉛以外の90%は基地であり、これが強度を決める、といわれている⁽¹⁰⁾。

通常、铸铁の基地組織はフェライトとパーライトである。しかし、パーライトはフェライト基地にセメントイトが分散した共析組織であり、パーライトの強度(硬さ)はセメントイトの量と形態、それにフェライトの強度で決まる。セメントイトの量と形態に関しては鉄鋼便覧⁽¹¹⁾に詳細が記述されているので参照いただきたい。

フェライトの強さに対する合金元素の影響を図3⁽¹²⁾に示す。これより、铸铁の主要合金元素であるシリコンやマンガンはフェライトの著しい強化元素であることがわかる。

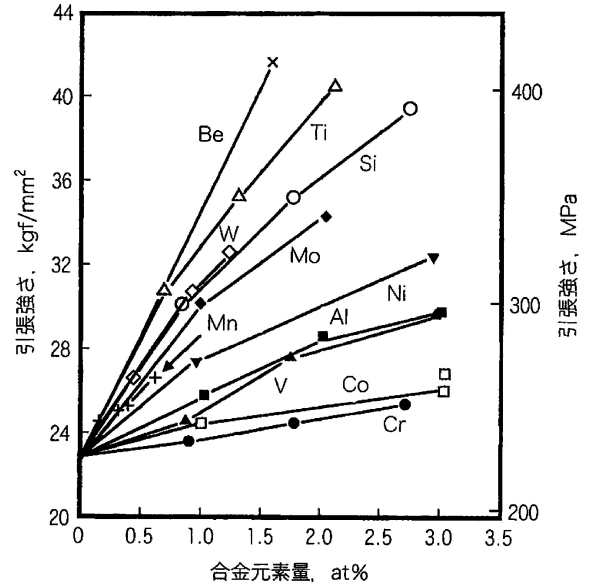


図3 フェライトの引張強さに及ぼす合金元素の影響⁽¹²⁾.

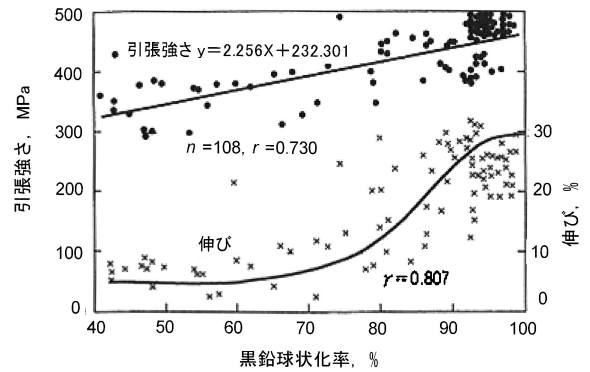


図4 球状黒鉛铸铁の機械的性質に及ぼす球状化率の影響⁽¹³⁾.

球状黒鉛铸铁で最も重要な要因は黒鉛の形状であり、球に近いことが不可欠である。フェライト基地铸铁について、黒鉛球状化率と引張強さ、伸びの関係を図4⁽¹³⁾に示す。引張強さは黒鉛球状化率に比例するが、伸びは黒鉛球状化率が80%を超える付近から急増していることがわかる。ここには記載されていないが、衝撃値はさらに黒鉛球状化率に敏感であり、球状化率の向上と共に増大することが明らかにされている。

球状黒鉛铸铁の機械的性質は、一般的にはMnやCuなどのパーライト安定化元素の添加により基地組織で制御している。これに関しては、図5⁽¹⁴⁾のような結果が報告されている。図中で複合則の値とは、球状黒鉛铸铁の引張強さを単純にフェライト基地とパーライト基地の引張強さに、その体積分率を掛けて求めた値である。これらの値はほとんど一致しており、まさに基地組織だけで引張強さが決まっていることを明確に示している。また、図に示すように、強度800MPa以上を求めるにはパーライト率は80%程度以上が必要

である。さらに伸びが10%以上に欲しい場合、パーライト率は70%程度以下に制御する必要がある。

機械的性質に及ぼす鋳物肉厚の影響は通常の金属材料と異なる。一般に金属材料の強度は結晶粒度の大きさに依存する。これはホールペッチの式として、強度が結晶粒径のルートに反比例することでよく知られている⁽¹⁵⁾。すなわち、結晶粒が細かいほど材料強度は向上する。一方で、鋳物の場合には肉厚が増すほど冷却速度は遅くなり、結晶粒は粗大化する。鋳鉄の場合には結晶粒以外にも黒鉛形態や基地組織も変化し、最終凝固部に微細な引け巣が発生することもある。従って、鋳鉄鋳物においては、機械的性質に及ぼす鋳物肉厚の影響を考慮することが不可欠である。

球状黒鉛鋳鉄の機械的性質の鋳物肉厚依存性を図6に示す⁽¹⁶⁾。この肉厚依存性は一般的に肉厚感度、あるいは肉厚感受性と呼ばれている。図よりパーライト系で肉厚感受性が高いことがわかる。これは、肉厚の増大による基地組織のフェライト量の増加が大きく影響している。しかし、フェライ

ト系にも肉厚感受性はあるが、その詳細な原因は明らかではない。球状黒鉛鋳鉄特有の現象として、肉厚の増加に伴う黒鉛球状化の低下や、フェライト組織の粗大化が機械的性質低下に影響しているのであろう。黒鉛球状化率の低下は大きな鋳物を作る際の問題になっている。

(2) 高強度、高延性球状黒鉛鋳鉄の特性と組織制御

近年、車両の足回り球状黒鉛鋳鉄製品は、軽量化と衝突安全性両方のニーズにより、高強度でより高い靱性が求められる。すなわち、材料の強度と伸びのバランスを最適化することが重要である。図7は強度800MPa-伸び10%、または強度600MPa-伸び20%を目標とする球状黒鉛鋳鉄材の開

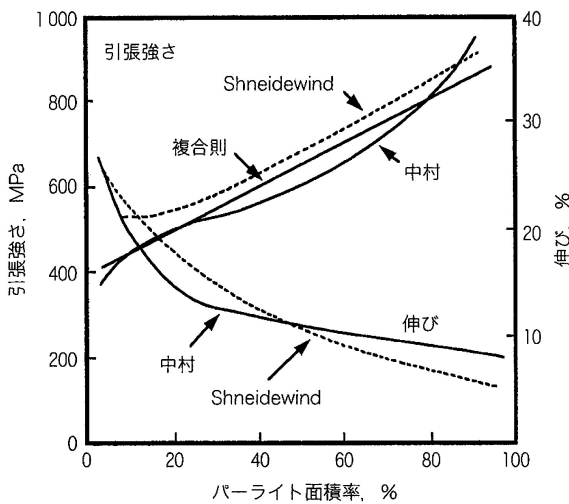


図5 球状黒鉛鋳鉄の機械的性質に及ぼす基地組織の影響⁽¹⁴⁾。

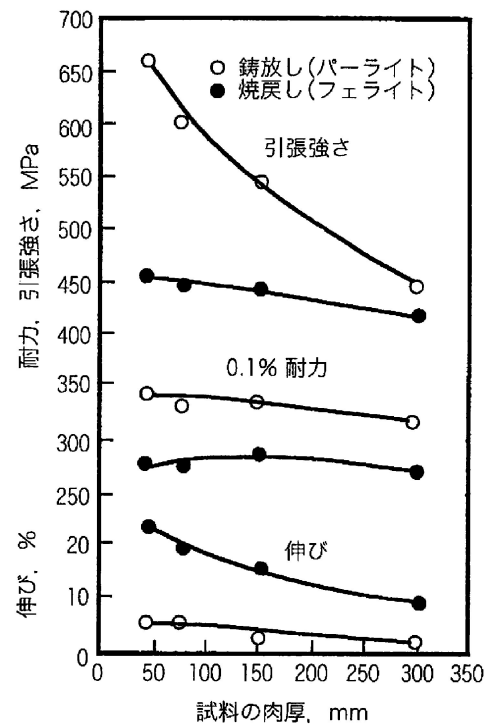
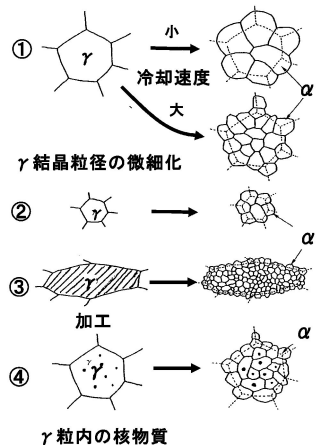
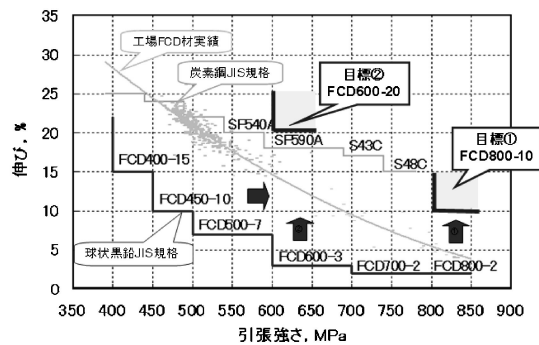


図6 球状黒鉛鋳鉄の機械的性質の肉厚依存性⁽¹⁶⁾。



(a) 低炭素鋼 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態による α 粒微細化法⁽¹⁷⁾。



(b) 高強度・高伸びFCD材開発目標とJIS規格材、従来材料の伸び-引張強さ線図との比較。

図7 鉄鋼材料の組織制御による強靱化の考え方⁽¹⁷⁾。

発に際し、その組織制御の考え方について示したものである。

(a) 鑄放し材の鑄造条件の最適化と組織制御及び特性

鉄鋼材料の強靱化の考え方(図7⁽¹⁷⁾)における①と②は、FCDにも適用可能である。これを実現するため、著者らは鑄放し球状黒鉛鑄鉄材における化学組成及び鑄造条件の最適化を検討した。すなわち、球状黒鉛鑄鉄材の基地組織の微細化(オーステナイト→フェライト)と冷し金による黒鉛粒数の増大による強靱化を検討した。その考え方をまとめて図8に示す。基地組織の微細化に関しては、ニッケルの影響⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾、硫黄の影響⁽²⁰⁾⁽²¹⁾を考慮し、別実験⁽²²⁾によりニッケルと硫黄の最適値を見出した。また、黒鉛粒数の増加による基地組織の微細化を目的に鑄造条件(冷し金や注湯温度、 A_1 変態点上、下型ばらし)を変化させ、引張強さと伸び特性への影響などを検討した⁽²²⁾。

表1にB号-YB⁽²³⁾の4種材料の鑄造条件と引張強さと伸びの関係を示す。 A_1 変態点温度の上、下での型ばらしの引張強さと伸びに対する影響を調べるため、 A_1 変態点の上、下で型ばらした時の結果を比較すると、1.5%Ni-FCD450材で、その影響が著しいことがわかる。

A_1 変態点以上で型ばらした時、強度-伸びのバランスがよくなっていた。一部試作材の引張-伸びの値は800MPa-10%以上、または600MPa-16%に達し、JIS規格球状黒鉛鑄鉄材の伸び(それぞれ2%と3%)を大きく上廻った。

A_1 変態点以上の高い温度で鑄型をばらすと、成分の相違(FCD450以外の3材種)に関係なく引張-伸び特性は大きく向上し、1.5%Ni-FCD、試作材1、試作材2間の差は少なく

なる傾向を確認した。

また、冷し金の有無や注湯温度などの鑄造条件の変化によって、引張-伸びが大きな影響を受ける材質も見受けられた(たとえば、高強度試作材1)。いずれにせよ、鑄造条件は鑄放し材の機械的性質に大きな影響をもたらすことが明らかである。

図9に高強度、高延性の目標を達成した鑄鉄材(表1に網掛けで示した)の組織を示す。これよりパーライト率が75~85%で、黒鉛球状化率が95%以上、黒鉛粒数は300個/mm²以上で強度と高い伸びを兼ね備えるFCD材が得られることがわかる。また、この程度の黒鉛粒数を得るには冷し金が不可欠なこともわかる。

(b) 熱処理条件の最適化と組織制御及び特性

球状黒鉛鑄鉄の基地組織の微細化により高強度-高延性材を得るために、特定の熱処理の検討を行った。この目的として、粒径数 μm のフェライトとパーライトからなる微細な2相混合組織とすることを検討した研究⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾がある。鋼の分

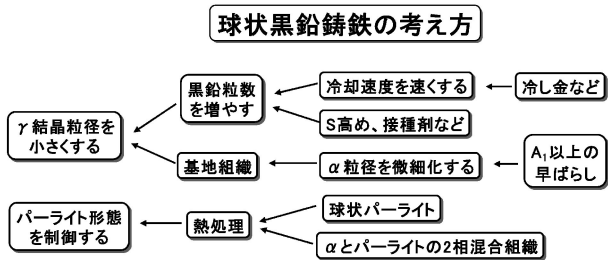
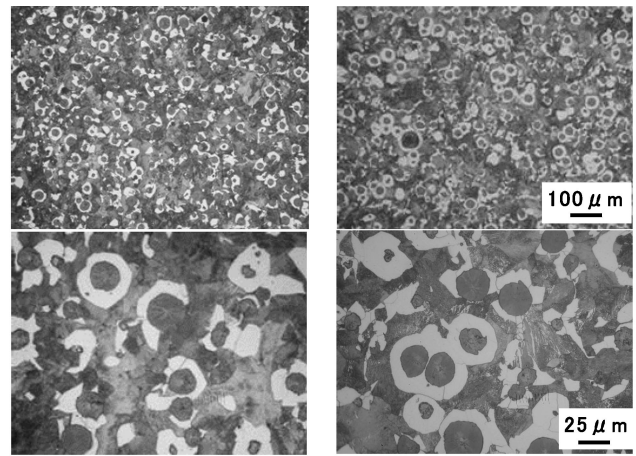


図8 球状黒鉛鑄鉄の組織制御による強靱化の考え方。



高強度1材:引張875MPa-伸び10.5%
球状化率:98.8%,粒数362個。
パーライト率:84.6%。
高強度2材:引張819MPa-伸び10.2%
球状化率:98.5%,粒数390個。
パーライト率:73.9%。
鑄造条件:冷し金×高温注湯× A_1 以上。 鑄造条件:冷し金×低温× A_1 以上ばらし。

図9 FCD800-10目標をクリアした高伸び材の基地組織。

表1 最適化実験材の諸性質(供試材: JIS B号 25 mm YB)⁽²³⁾。

供試材	鑄造条件の組み合わせ					黒鉛組織		基地組織	機械的性質		
	冷し金		鑄型ばらし		注湯温度		平均粒数 個/mm ²	球状化率 %	パーライト率 %	引張強さ MPa	伸び %
	あり	なし	A_1 以下	A_1 以上	高温	低温					
FCD450	○			○			269	98.2	37.8	644	16.0
1.5%Ni-FCD450		○	○				158	95.9	39.0	601	15.9
		○		○			162	95.5	81.3	902	9.0
高強度試作材 1	○			○			362	98.8	84.6	875	10.5
高強度試作材 2	○			○			390	98.5	73.9	819	10.2
		○		○			270	97.9	79.6	889	9.4

野では、結晶粒の微細化と第2相粒子の均一微細分散化による構造材料の強靱化が最も基本的な方策とされている⁽¹⁷⁾⁽²⁶⁾。亜共析鋼ではUp-quenching法と呼ばれる特殊な熱処理方法により、数 μm 径のフェライトとパーライトの均一な組織が得られている⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。これまでに、著者らはパーライト中の Fe_3C 相の層状から球状への組織遷移に関して、片状黒鉛鑄鉄の基地組織に対する硫黄量及び熱履歴の影響を報告した⁽²⁹⁾。

本稿では、FCD600-20%伸び材の開発を目的に熱処理条件と基地組織形態、さらには引張-伸び特性の変化に関して検討した幾つかの事例を紹介する。

(i) 球状パーライトの製造条件と組織及び特性

これまでの研究結果に基づいて球状パーライト組織を得る熱処理条件、加熱保持温度を1073 K, 1023 K, 973 Kとした結果を示す。図10に0.5%Cu-FCD450相当材にSnを0~0.06 mass%変化させた試料の熱処理組織写真を示す。これより973 K~1073 Kのいずれの場合も、パーライト組織は球状(PG)と層状(PL)の混合組織である。しかし、1073 K熱処理材では局部的にコロニー状パーライトを示した。

図11と図12にこれら球状パーライトを立体的観察したSEM写真を示す。これらの試料はフェライト相だけを腐食除去させたもので⁽³⁰⁾、 Fe_3C 相を立体的に見ると、1023 K熱処理試料は棒状組織になっている。一方、1073 K熱処理材は珊瑚状になっていることがわかる。

これらの試料の引張特性をJIS規格との対比で図13に示す。これより球状(棒状)パーライトよりも球状(珊瑚状)とコロニー状パーライトを呈した材料が、引張強度-伸びのバランスがよいことがわかる。

(ii) 2相混合組織材の熱処理条件と組織及び特性

フェライトとパーライトからなる2相混合組織を得る熱処理条件としては、1173 K-60 min保持に続いて、1073 K-40 min保持を行い、その後空冷した。この実験では

FCD450材、1.5%Ni-FCD450材と高強度試作材1を用いた。熱処理により得られた材料の引張-伸び特性を図14に示す。図に示すように鑄放し材に比べ、Ni-FCD材と試作材1では引張強さは向上し、伸びにも向上している。

その原因を、これら供試材の顕微鏡組織(図15)とともに考えると、鑄放し組織(上段)に対し、熱処理材(下段)では、中・高強度材ほど2相混合組織を呈している。

また、フェライトの結晶粒径(図中 \leftrightarrow で示した)はいずれ

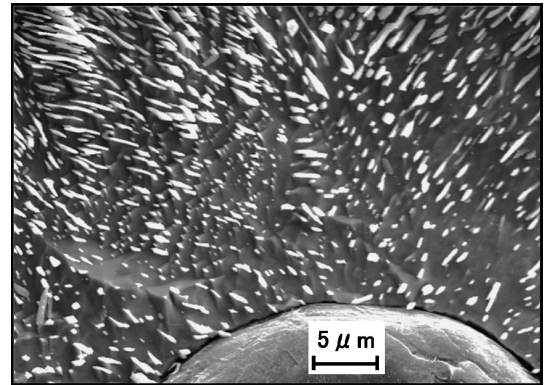


図11 1023 K熱処理した6Sn(0.06%)材の球状パーライト(SEM)。

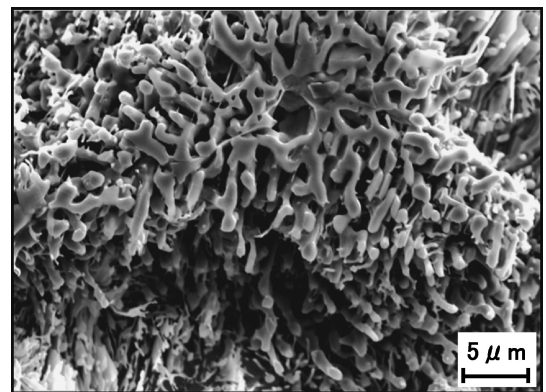


図12 1073 K熱処理した4Sn(0.045%Sn)材の球状パーライト(SEM)。

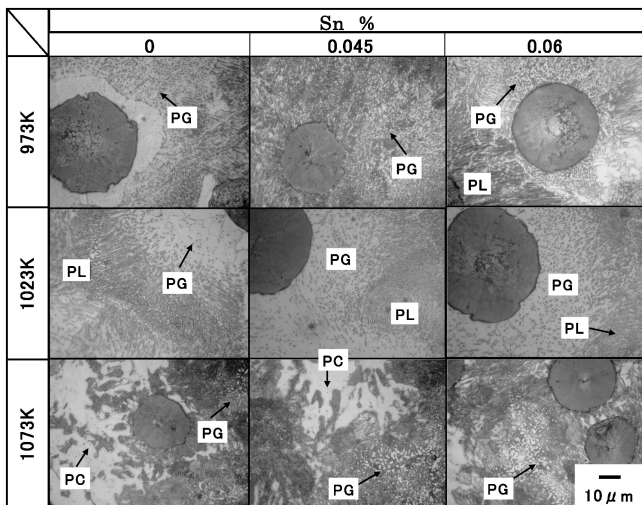


図10 Sn添加した0.5%Cu-FCD450材の熱処理条件と基地組織(PL:層状, PG:球状, PC:コロニー状)。

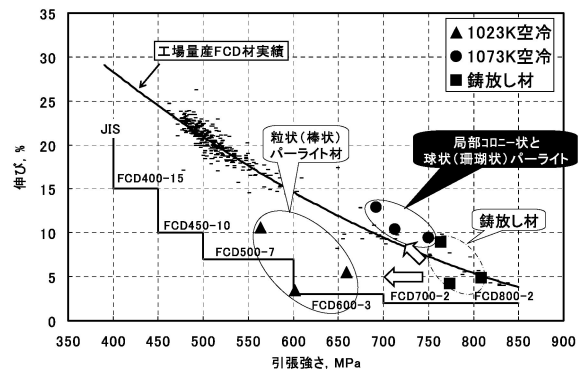


図13 Sn添加材の引張強さと伸びの関係(鑄放し材, 熱処理材)。

の供試材の場合とも、熱処理材が鑄放し材に比較して細かくなっていることがわかる。

2相混合組織材が機械的性質に勝る原因を図16に示す模式図で考えてみる。ここではブルスアイ組織材(鑄放し材)と2相混合組織材(熱処理材)の組織特徴を模式図化した。仮に両者のフェライト量は全く同じと考える。すると、図中矢印の方向に引っ張られた時、鑄放し材ではフェライトが周りのパーライト(フェライトに比べ変形能が小さく、伸びが小さい)に拘束され低い伸びとなる。これに対し、2相混合組織材では、フェライトが分散してネットワーク状に分布しているため、周りのパーライトの拘束力が弱くなり、大きな伸びを示すことができると考える。

一方、2相混合組織熱処理材の強度の向上と組織の関係は、パーライト率からは説明できない。しかし、フェライトの結晶粒径の熱処理前後の変化を確認すると、熱処理後は平

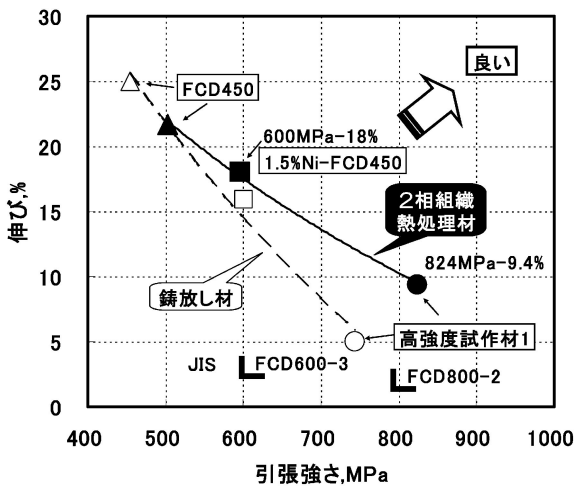


図14 3つの供試材の鑄放し材と2相混合組織熱処理材の引張強さと伸びの関係。

均粒径が細かくなっていることが明らかである。このことから、微細な結晶粒ほど隣接粒子への応力集中を弱める効果が強いことが、強度の向上に大きく寄与している⁽²⁵⁾と考えられる。

3. おわりに

近年の高強度・高延性球状黒鉛鑄鉄材の開発ニーズに対し、化学組成、鑄放しと熱処理条件(冷却条件)による組織制御で高い強度と伸び特性を具備した球状黒鉛鑄鉄材料の製法について記述した。開発した800 MPa-10%高強度・高延性鑄放し球状黒鉛鑄鉄材を用い、CAE手法[†]により形状の最適化を図ることにより実用化した製品は中型車ビーム(17 kg)、大型車ブラケットとビーム(20 kgと34 kg)である。このような製品においてFCD材の高強度・高延性化により現行のFCD450相当材の同種製品に比べ10%~40%の軽量化と、アルミ材と同等程度の重量を達成しかもコストが安

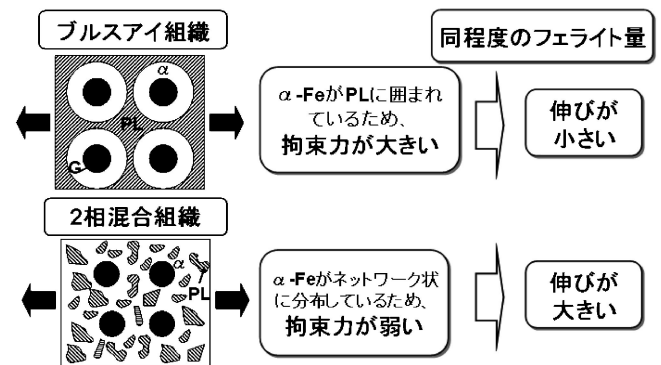


図16 ブルスアイ組織材と2相混合組織材の組織模式図と伸び特性考察図(α :フェライト, PL:パーライト, G:グラファイト)。

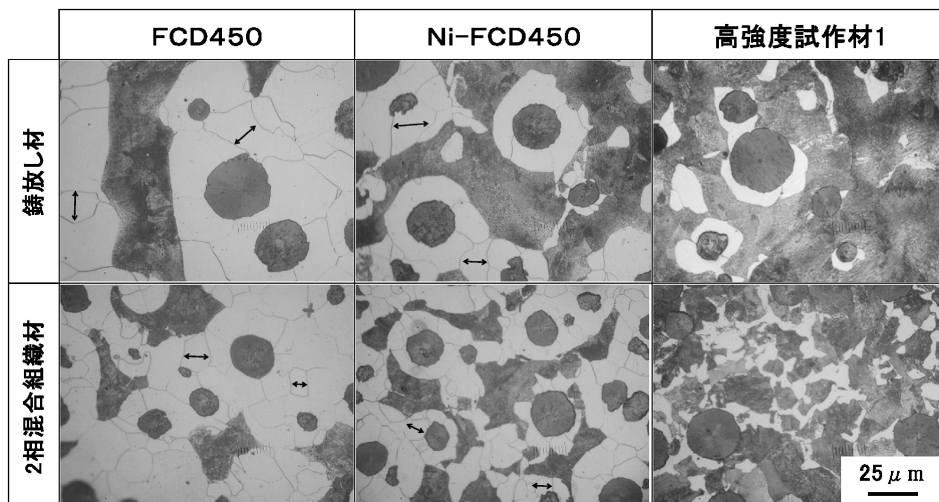


図15 3つの供試材の鑄放し材と2相混合組織熱処理材の基地組織。

[†] ここでのCAE手法とはFEM構造解析法により高精度の応力解析を行ったことである。

い。これらの事実により、今後も更なる発展が期待されている。

大型バスのサポートビーム、トラックではエアサスペンション部品であるロッドブラケットやサポートビームなどの薄肉軽量化を実現するため、更なる高強度・高延性化材の開発は必要不可欠である。

文 献

- (1) 藤根 学, 林 壮一, 須藤俊太郎, 大橋 豊: TOYOTA Technical Review, **53**(2004), 40-47.
- (2) 早坂敏明, 壇 博貴, 松田眞一, 藤田浩一, 藁科永充: 自動車技術会, 学術講演会前刷集, **20-07**(2007), 11-14.
- (3) 林 壮一: JACT NEWS, (2002), 21-25.
- (4) 飯田一郎監修: 球状黒鉛鑄鉄の研究, 日刊工業新聞社, (1952), 1-2.
- (5) 山本美喜雄編: 球状黒鉛の理論と実際, 丸善, (1966), 169.
- (6) 日本規格協会編: JISハンドブック①, 鉄鋼 I, (2004), 1269.
- (7) 原田昭治, 小林俊郎, 野口 徹, 鈴木秀人, 矢野 満共同編著: 球状黒鉛鑄鉄の強度評価, アグネセンター, (1999), 223-234.
- (8) 日本鑄造工学会編: 鑄造工学便覧, 丸善, (2002), 223.
- (9) 日本規格協会編: JISハンドブック①, 鉄鋼 I, (2004), 1262, 1273, 1277.
- (10) 日本鑄造工学会編: 鑄造工学便覧, 丸善, (2002), 254.
- (11) 日本鉄鋼協会編: 第3版, 鉄鋼便覧, I 基礎, 丸善, (1981), 436-441.
- (12) 中江秀雄: 鑄造工学, 新版, 産業図書, (2008), 47.
- (13) 日本鑄造工学会編: 鑄造工学便覧, 丸善, (2002), 255.
- (14) 原田昭治, 小林俊郎編: 球状黒鉛鑄鉄の強度評価, アグネ技術センター, (1999), 61.
- (15) 例えば, 熊井 浩, 野田龍彦訳: レスリー鉄鋼材料学, 丸善, (1985), 19.
- (16) 日本鑄造工学会編: 鑄造工学便覧, 丸善, (2002), 260.

- (17) 牧 正志: 金属, **61**(1991), 3.
- (18) W. ダール監修/小林俊郎・梶野利彦共訳編: 鉄鋼材料工学, 蝸新日本鑄鍛協会, (1982), 7.
- (19) 長船康裕, 田中雄一: 鑄造工学, **69**(1997), 309-315.
- (20) H. Nakae and Y. Igarashi: Mater. Trans., **43**(2002), 2826-2831.
- (21) 五十嵐芳夫, 中江秀雄: 鑄造工学, **74**(2002), 30-35.
- (22) 趙 柏榮: 博士学位論文, 早稲田大学, (2012), 114, 134-136, 142.
- (23) 日本規格協会編: JISハンドブック①, 鉄鋼 I, (2004), 1266.
- (24) 田中雄一, 井川克也: 鑄物, **47**(1975), 847-853.
- (25) 田中雄一, 井川克也: 鑄物, **48**(1976), 622-628.
- (26) 藤田広志: 金属, **57**(1987), 5.
- (27) R. A. Grange: Trans., ASM, **59**(1966), 26.
- (28) B. Karlsson: Mater. Sci. Eng., **11**(1973), 185.
- (29) 中江秀雄, 杉田一久, 趙 柏榮: 鑄造工学, **78**(2006), 457-463.
- (30) 五十嵐芳夫: 金属, **67**(1997), 664-674.

★★
趙 柏榮

1993年3月 早稲田大学理工学研究科修士課程修了
1993年4月 現職
2012年2月 早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 博士学位取得
専門分野: 鑄鉄(鑄造)
◎自動車, 産業機械用鑄鉄部材の材料開発に従事. 片状黒鉛鑄鉄の高強度化, 減衰能向上や球状黒鉛鑄鉄の高強度-高延性材などの新材料開発, 生産技術を中心に活動.

★★



趙 柏榮



鈴木進補



中江秀雄