

# 球状黒鉛鑄鉄の金属組織に及ぼす銅及びビスマスの複合添加の影響\*

高川 貫仁\*\*

球状黒鉛鑄鉄の高強度化及び高延性化を目的に、パーライト促進元素である銅を0~2 mass%、黒鉛粒数を増加させるビスマスを0~0.005 mass%複合添加し、金属組織に及ぼす銅及びビスマスの複合添加の影響を調べた。その結果、銅を単独添加した場合、黒鉛粒数は銅添加量の増加に伴い減少した。さらにビスマスを複合添加した場合、黒鉛粒数は銅添加量の増加に伴いさらに大きく減少した。これは、銅添加により、黒鉛核形成元素であるマグネシウムやビスマスは銅と介在物を形成し消費されるためと考えられた。黒鉛形状は、銅添加量2 mass%にビスマスを複合添加した場合、糸状及び擬球状に崩れた。

**キーワード：** 球状黒鉛鑄鉄、銅、ビスマス、黒鉛粒数

## Effect of Combined Addition of Copper and Bismuth on Microstructure in Spheroidal Graphite Cast Iron

TAKAGAWA Takahito

**Key words :** spheroidal graphite cast iron, Copper, Bismuth, graphite nodule count,

### 1 緒言

近年、輸送機器や産業機械等の鑄鉄部品において、環境負荷低減の観点から、軽量化や衝撃安全性を向上させる必要があり、鑄鉄材料の高強度化及び高延性化が求められる。高強度化には一般的にパーライト促進元素であるマンガンや銅が添加される<sup>1)</sup>。高延性化には結晶粒の微細化、つまりは黒鉛粒数の増加のために、接種<sup>2)</sup>やビスマスなどが添加される<sup>3)</sup>。一方で、銅やビスマスは黒鉛球状化阻害元素でもあり、銅は2.2 mass%、ビスマスは0.006 mass%を超えると黒鉛の球状化が崩れるという報告がある<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、球状黒鉛鑄鉄の高強度化及び高延性化を目的に、高強度化にはパーライト促進元素である銅を添加、高延性化には黒鉛を微細化、つまり黒鉛粒数を増加させるビスマスを添加し、金属組織に及ぼす黒鉛の球状化が崩れない濃度範囲で添加した銅及びビスマスの複合添加の影響を調べた。

### 2 実験方法

球状黒鉛鑄鉄の目標組成を表1に示す。銅は0 mass%、0.5 mass%、1 mass%、2 mass%と4水準に変化させ、ビスマスは無添加と0.005 mass%の2水準に変化させた。

溶解は、10番黒鉛るつぼに、鉄及び電解鉄を入れ、溶け落ち後、フェロシリコン、フェロマンガン、硫化鉄

及び電解銅で成分調整を行った。黒鉛球状化処理用るつぼに金属ビスマス及び黒鉛球状化処理剤をセットした後、1500℃でるつぼを炉から取り出し、サンドイッチ法により黒鉛球状化処理を行った。その後接種を行い、図1に示す階段状試験片及び分析用金型に注湯した。なお本実験の溶湯処理剤には、添加元素の影響をできるだけ単純化させるために、黒鉛球状化剤にはREを含まないFe-44%Si-6%Mg合金、接種剤にはシリコン以外の配合成分を含まないFe-75%Si合金を使用した。

表1 球状黒鉛鑄鉄の目標組成

(mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Cu	Bi
3.9	2.7	0.2	0.01	0.02	0	0
					0.5	0.005
					1.0	
					2.0	

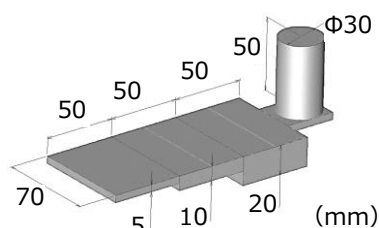


図1 階段状試験片

\* 令和4年度技術シーズ創生・発展研究事業（可能性調査研究）  
\*\* 素形材プロセス技術部

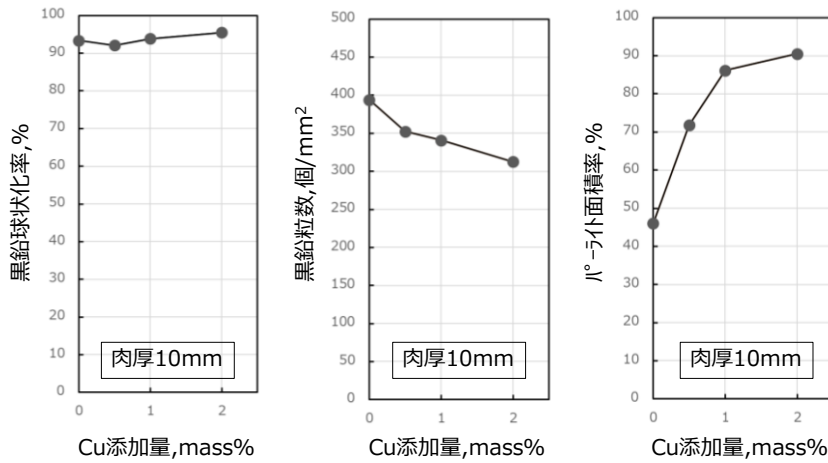


図2 金属組織に及ぼす銅添加量の影響 (ビスマス無添加)

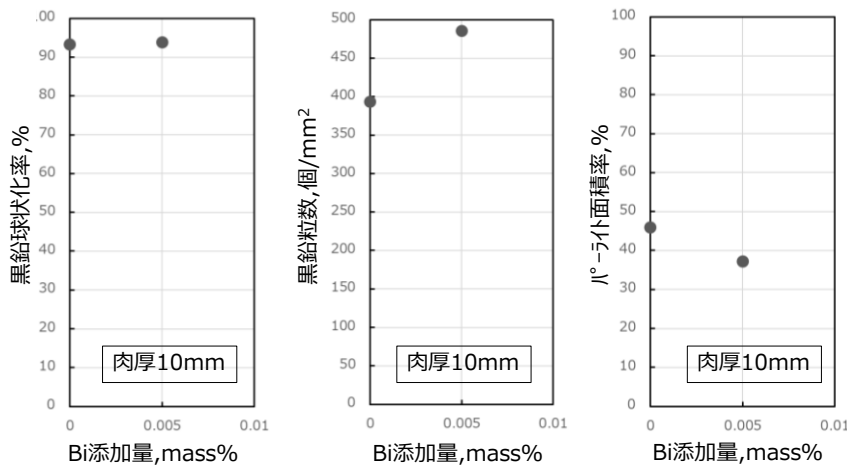


図3 金属組織に及ぼすビスマス添加量の影響 (銅無添加)

階段状試験片の肉厚は5 mm、10 mm、20 mmの3水準であり、肉厚10 mmの中央部分について組織観察、比較的冷却速度が速い肉厚5 mmの中央部分についてSEM-EDSによる元素分析を行った。

### 3 結果及び考察

#### 3-1 金属組織に及ぼす銅及びビスマス単独添加の影響

ビスマス無添加における金属組織に及ぼす銅添加量の影響を図2に示す。黒鉛球状化率は銅添加量が増加してもほぼ一定で90%以上であった。黒鉛粒数は銅添加量の増加に伴い約390個/mm<sup>2</sup>から310個/mm<sup>2</sup>に減少した。パーライト面積率は銅無添加の場合46%であったのに対し、銅添加量0.5 mass%では72%と急激に増加、さらに添加量2 mass%で91%まで増加し、本実験においても銅はパーライト促進元素であることを確認できた。

次に銅無添加における金属組織に及ぼすビスマス添加量の影響を図3に示す。黒鉛球状化率はビスマスを添加してもほぼ一定で90%以上であった。黒鉛粒数は

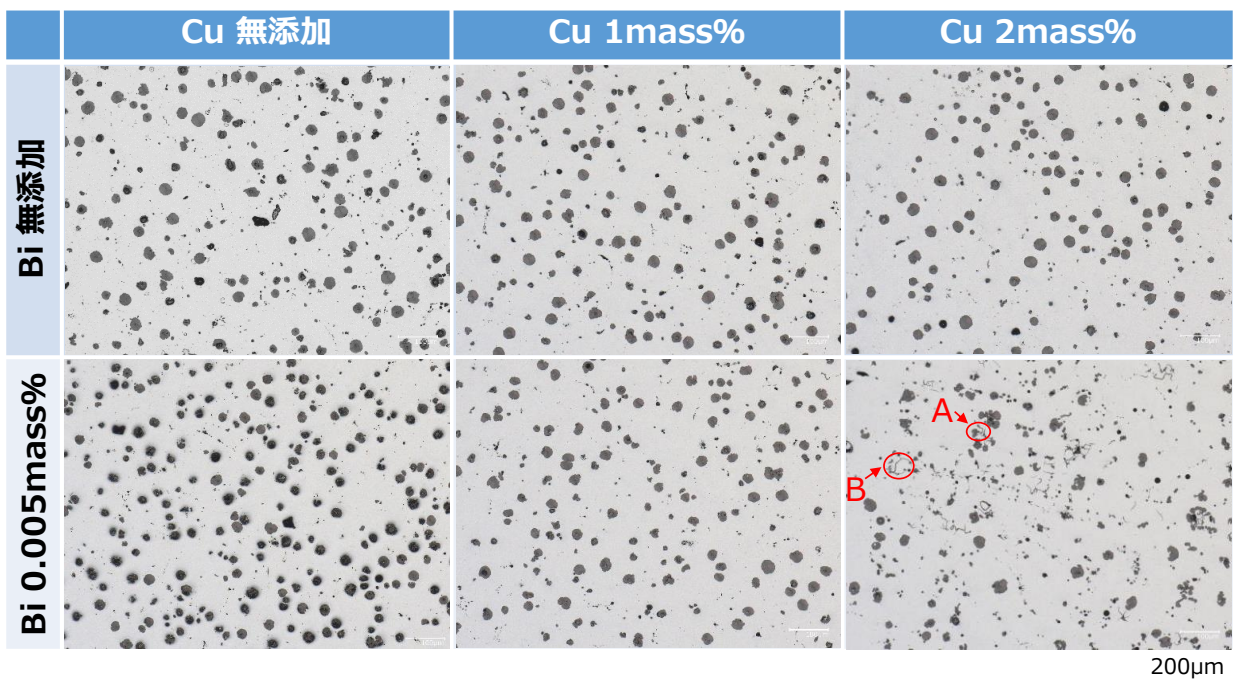


図4 銅及びビスマスを添加した試料の黒鉛組織

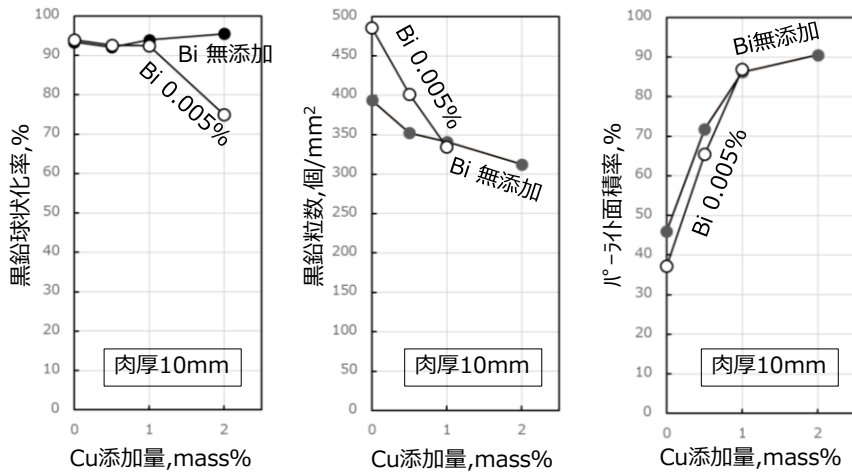


図5 金属組織に及ぼす銅及びビスマス添加量の影響

ビスマス添加により約 390 個/mm<sup>2</sup>から約 490 個/mm<sup>2</sup>に増加し、本実験においてもビスマスは黒鉛粒数を増加させる元素であることを確認できた。パーライト面積率はビ

スマス添加により 46%から 37%に減少した。これは黒鉛粒数の増加によりフェライト面積率が増加したためと考えられる。

### 3-2 金属組織に及ぼす銅及びビスマス複合添加の影響

銅及びビスマスを複合添加した試料の黒鉛組織写真を図4に示す。ビスマス無添加の場合、黒鉛組織はいずれの銅添加量においても球状になっているが、ビスマス添加試料では、銅添加量2%において球状から形を崩し、糸くず状(図中矢印A)や擬球状(図中矢印B)などの黒鉛組織となった。

図5に金属組織に及ぼす銅及びビスマス添加量の影響を示す。ここで黒鉛粒数の図において、この図は球状黒鉛の粒数の変化を示すことが目的であることから、球状以外の黒鉛が多く混在するビスマス 0.005 mass%、銅 2 mass%添加した試料はプロットしていない。黒鉛球状化率は、ビスマス添加の場合、銅添加量 2 mass%で 75%と大きく低下し、JIS 規格である「80%以上」を下回る結果となった。黒鉛粒数は、ビスマス無添加試料においても銅添加量の増加に伴い低下したが、ビスマス添加によりさらに大きく低下し、銅添加量 1%ではビスマス添加の有無にかかわらずほぼ同じ値になり、ビスマス添加による黒鉛粒数増加の効果は無くなった。

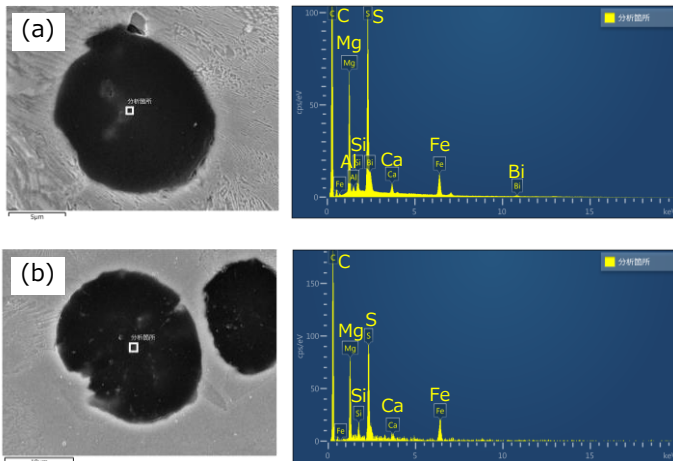


図6 黒鉛核近傍のSEM-EDS結果

(a) 銅無添加+ビスマス添加, (b) 銅添加量 1 mass%+ビスマス添加

### 3-3 銅及びビスマス添加による黒鉛核及び基地介在物の成分

銅添加していないものと、銅添加量 1 mass%のビスマス添加試料の黒鉛核近傍のSEM-EDS結果を図6に示す。銅無添加の場合の黒鉛核近傍からは主にマグネシウム、シリコン、硫黄等が検出され、さらにビスマスも検出された。しかし銅添加量 1 mass%の黒鉛核からはビスマスは検出されなかった。

次に銅添加量 1 mass%のビスマス添加及び無添加の基地介在物のSEM-EDS結果を図7に示す。ビスマス無添加の介在物からはマグネシウム、銅、アルミニウム及び鉄等が検出され、基地中にマグネシウム及び銅を含む介在物が確認された。ビスマス添加の介在物からはマグネシウム、銅、アルミニウム及び鉄等の他にビスマスも検出され、マグネシウム、銅及びビスマスを含む介在物が確認された。

これらの分析結果より、銅添加量の増加に伴い黒鉛粒数が減少した原因は、銅添加によ

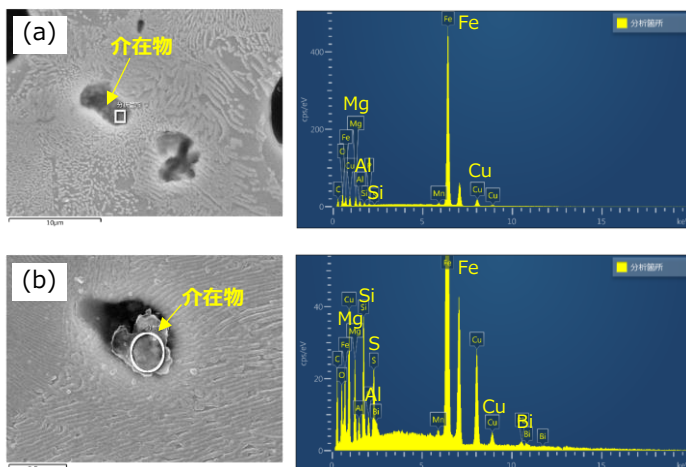


図7 基地介在物のSEM-EDS結果

(a) 銅添加量 1 mass%, (b) 銅添加量 1 mass%+ビスマス添加

る何らかの作用により、黒鉛核形成元素であるマグネシウムが鉄基地中に銅を含む介在物を形成することにより消費され、黒鉛核形成に必要なマグネシウムが十分に確保されないため、結果として黒鉛核形成機能が低下したと考えられた。また、銅及びビスマスを複合添加した場合、ビスマスの黒鉛粒数増加の効果が低下する原因も、銅添加によりビスマスが鉄基地中に銅を含む介在物を形成して消費され、黒鉛核形成元素としての機能が低下したと考えられた。ただし、銅添加量 2 mass%においてビスマスを複合添加することにより黒鉛形状が崩れる原因は本実験では明らかに出来なかった。

今後の球状黒鉛鑄鉄の高強度化及び高延性化の検討においては、黒鉛粒数を減少させない高強度化元素、もしくは銅を添加しても黒鉛粒数増加の効果を弱めない高延性化元素など、他の元素との組み合わせを検討する必要があると考えられた。

#### 4 結 言

- (1) 銅を 0~2 mass% 単独添加した場合、パーライト面積率は 46% から 91% に増加した。黒鉛粒数は約 390 個/mm<sup>2</sup> から 310 個/mm<sup>2</sup> に減少した。
- (2) ビスマスを 0~0.005 mass% 単独添加した場合、黒鉛粒数は約 390 個/mm<sup>2</sup> から 490 個/mm<sup>2</sup> に増加し、ビスマスは黒鉛粒数を増加させる元素であることを確認した。パーライト面積率は 46% から 37% に減少した。
- (3) 銅及びビスマスを複合添加した場合、ビスマス添加による黒鉛粒数増加の効果は低下し、銅添加量 1 mass%

ではビスマス無添加とビスマス添加の黒鉛粒数は同じ値になった。

(4) 銅及びビスマスを複合添加した場合、銅添加量 2 mass% で黒鉛形状は崩れた。

(5) 銅単独添加試料からマグネシウム及び銅を含む介在物が観察された。また銅及びビスマスを複合添加した試料からはマグネシウム、銅及びビスマスを含む介在物が観察された。

(6) 銅添加により黒鉛粒数が減少した原因は、黒鉛核形成元素であるマグネシウムが銅と介在物を形成することにより消費され、核生成元素として機能が低下するためと考えられた。銅及びビスマスの複合添加によりビスマスの黒鉛粒数増加の効果が低下する原因も、銅と介在物を形成し消費されるためと考えられた。

#### 謝 辞

本研究は、岩手大学大学院総合科学研究科 金型・鑄造プログラム特別研究(長期インターンシップ)の研究テーマとして大学院 鈴木海斗氏に多大な協力を頂いた。心から感謝します。

#### 文 献

- 1) 日本鑄造工学会：鑄造工学便覧 (2002)
- 2) 安藤正, 岡田和彦, 佐藤和則, 山田聡：鑄造工学 84 (2012) 702
- 3) 堀江皓, 小綿利憲：鑄物 60 (1988) 3, 173