

オーステンパ球状黒鉛鑄鉄の衝撃特性に及ぼす銅の影響*

高川 貫仁**

銅含有量を 0 から 0.9%まで変化させた球状黒鉛鑄鉄をオーステンパ熱処理し、衝撃特性に及ぼす銅の影響について調べた。銅含有量の増加に伴い不安定オーステナイトは減少し、衝撃吸収エネルギーも銅含有量の増加に伴い向上した。衝撃吸収エネルギーは、銅含有量 0.9%、処理温度 400℃、保持時間 15 分の条件において、最大値 145 J/cm²を示した。

キーワード：オーステンパ球状黒鉛鑄鉄、衝撃特性、銅、不安定オーステナイト

Effect of Copper on Impact Characteristics of Austempered Ductile Cast Iron

TAKAGAWA Takahito

Key words : austempered ductile cast iron, impact characteristics, copper, unstable austenite

1 緒言

近年、鑄鉄部品の軽量化や衝撃荷重に対する安全性の向上が求められており、これに伴い、鑄鉄材料の高強度化のみならず、強じん化も求められている。

高強度の鑄鉄として、オーステンパ球状黒鉛鑄鉄（以下、ADI (Austempered Ductile Cast Iron) と記す）がある。ADI は、球状黒鉛鑄鉄をオーステンパ熱処理することにより得られ、鉄基地組織はベイナイトというじん性のある組織になる。しかし ADI の鉄基地組織は、全てがベイナイトから成っているわけではなく、じん性を損なう不安定オーステナイト組織も混在している。そのため ADI のじん性の向上には、不安定オーステナイトの制御が重要と言われている^{1), 2)}。

不安定オーステナイトの生成要因として、鉄基地中に固溶する炭素やマンガンなどの合金元素の偏析がある。炭素が偏析することにより、ベイナイト化時において、鉄基地の大部分がベイナイトになったとしても、炭素濃度が低い共晶セル境界は不安定オーステナイトのまま残存する³⁾。

一方で、銅は球状黒鉛周辺に偏析し膜を形成し、黒鉛と鉄基地の炭素の拡散を妨げると言われている⁴⁾。そのため、銅の添加により、鉄基地中の炭素濃度の偏析を制御し、オーステナイト化時の不安定オーステナイトの発生を抑制できる可能性がある。

そこで本研究では、ADI の耐衝撃性を向上させることを目的に、金属組織及び衝撃特性に及ぼす銅の影響を調べた。

2 実験方法

2-1 金属組織の評価

供試材は、目標組成 3.9 mass% (以下、%と記す) C-2.7%Si-0.2%Mn-0~0.9%Cu の黒鉛球状化処理を行った約 5 kg の鑄鉄溶湯を、肉厚 5、10、25 mm、幅 72 mm、全長 75 mm の階段状の CO₂ 鑄型に注湯し作製した。得られた供試材の肉厚 10 mm の部分から 10 mm 角の試験片を 10 個採取し、9 個は熱処理用、1 個は生材の組織観察用とした。熱処理前の組織は、黒鉛、フェライト及びパーライトから成り、銅添加の試料はブルズアイ組織となっている。黒鉛粒数は銅含有量 0、0.5、0.9% の順に、589、519、463 個/mm²、パーライト面積率は 23、56、77% である。

オーステンパ熱処理は、まず 900℃ の大気炉において 30 分保持しオーステナイト化処理を行った後、300~400℃ の金属スズ浴に急冷し、スズ浴にて 15~60 分保持しベイナイト化処理を行なった。ベイナイト化処理後、スズ浴から取り出し空冷した。

得られた試験片について組織観察を行った。なお基地組織の観察は 3% ナイタールで腐食させて行った。

2-2 衝撃特性の評価

金属組織の評価結果を基に、不安定オーステナイトが少なく、微細なベイナイトが得られる熱処理条件を絞り込み、それらの条件で衝撃特性の評価を行った。

供試材は、2-1 と同様に溶製した鑄鉄溶湯を、165×100×18mm の板状の CO₂ 鑄型に注湯し作製した。試験片の黒鉛粒数は、銅含有量 0、0.5、0.9% の順に 378、301、294 個/mm² である。得られた供試材 1 点から、10×10×55 mm の溝無し衝撃試験片を 9 本採取しオーステンパ熱処理を行った。オーステナイト化条件は 900℃ で 1 時間とした。

* 平成 31 年度技術シーズ創生研究事業 発展ステージ

** 素形材プロセス技術部

得られた試料について、300 J のシャルピー衝撃試験機を用いて室温にて衝撃試験を行った。また一部の試験片について、衝撃試験後の端の部分切断し、ロックウェル硬さ試験及び組織観察を行った。

3 結果及び考察

3-1 金属組織の評価

図 1 に、ベイナイト化処理温度 (以下、処理温度と記す) 300℃ でベイナイト化保持時間 (以下、保持時間と記す) 60 分、350℃ で 15~60 分及び 400℃ で 15 分における、銅含有量を変化させた試料の組織写真を示す。主な基地組織はベイナイトであり、共晶セル境界に白く塊状に存在するのが不安定オーステナイトである。処理温度 300℃ では 60 分と長く保持しても、いずれの銅含有量においても不安定オーステナイトは観察された (図中、矢印部)。一方で、400℃ の高い処理温度では、15 分と短い保持時間で、いずれの銅含有量においても不安定オーステナイトは観察されなかった。処理温度 350℃ では、いずれの保持時間においても銅含有量の増加に伴い不安定オーステナイトは減少し、保持時間 30 分の場合は銅含有量 0.9% で、また保持時間 60 分の場合は銅含有量 0.5% 以上で不安定オーステナイトは観察されなくなった。このように銅含有量の増加に伴い不安定オーステナイトが減少した理由は、球状黒鉛周辺に銅が膜をつくり、これによりオーステナイト化時における黒鉛と鉄基地間の炭素の拡散が抑制され鉄基地内の炭素濃度の均一化が進み、不安定オーステナイトの生成が抑制されたと考えられる。

次に、銅含有量 0.9%、処理温度 350℃ における、保持時間 15 分及び 60 分の拡大した組織写真を図 2 に示す。

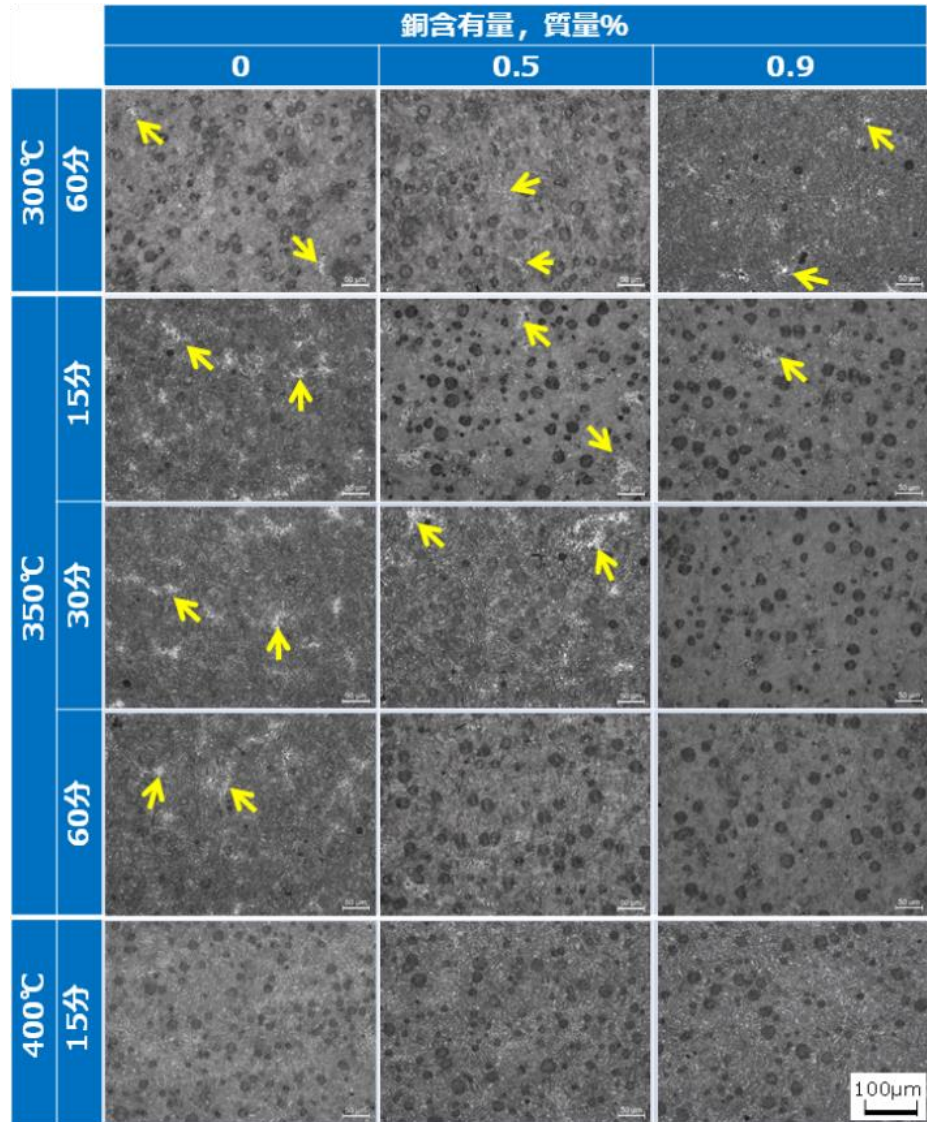


図 1 銅含有量を変化させた組織写真

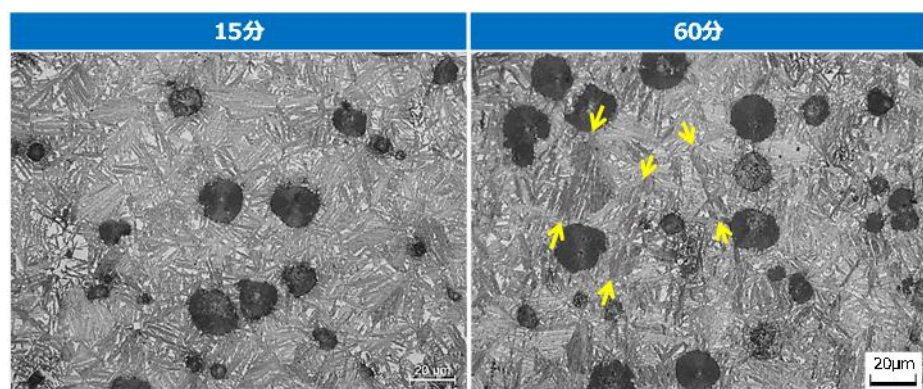


図 2 銅含有量 0.9%、処理温度 350℃ における保持時間 15 分及び 60 分の組織写真

保持時間 15 分では、ベイナイトは、針状の下部ベイナイト及びそれよりも太く先端が丸くなった上部ベイナイトから成るが、保持時間 60 分では大部分が上部ベイナイトであり、さらに長く粗大に成長した上部ベイナイトも混在していた (図中、矢印で挟んだ組織)。

これらの組織観察結果より、まず不安定オーステナイトはじん性を低下させるため、銅含有量を変化させても不安定オーステナイトが観察された 350°C で 15 分の熱処理条件及び処理温度 300°C の全条件は、衝撃特性の評価対象から外すこととした。また粗大な組織はじん性に悪影響を及ぼすため、ベイナイトが粗大に成長する保持時間 60 分の熱処理条件も衝撃特性の評価対象から外すこととし、衝撃特性の評価を行う熱処理条件は、処理温度 350°C で保持時間 15 分、処理温度 400°C で保持時間 15 分及び 30 分とした。

3-2 衝撃特性の評価

図 3 に衝撃試験片の代表的な組織写真を示す。ベイナイト組織は、いずれの銅含有量においても、処理温度 350°C では緻密な針状の下部ベイナイトが主であり、400°C では針状から太く丸みを帯びた羽毛状の上部ベイナイトになっていた。また銅無添加では、いずれの処理条件においても白色の不安定オーステナイトが共晶セル境界に観察されたが(図中、矢印部)、銅添加試料では不安定オーステナイトは観察されなかった。また図には示さないが、不安定オーステナイト組織は、金属組織の評価結果と同様に、処理温度の上昇及び処理時間の経過とともに減少した。

図 4 にロックウェル硬さに及ぼす銅含有量の影響を示す。硬さは全ての銅含有量において、処理温度 350°C の方が 400°C に比べて HRC で 7~8 高い値を示した。これは図 3 より、処理温度 350°C のベイナイト組織が、400°C で生成した羽毛状の上部ベイナイトよりも硬い緻密な針状の下部ベイナイトが主であるためと考えられる。一方、銅含有量の増加に伴う硬さの上昇は処理温

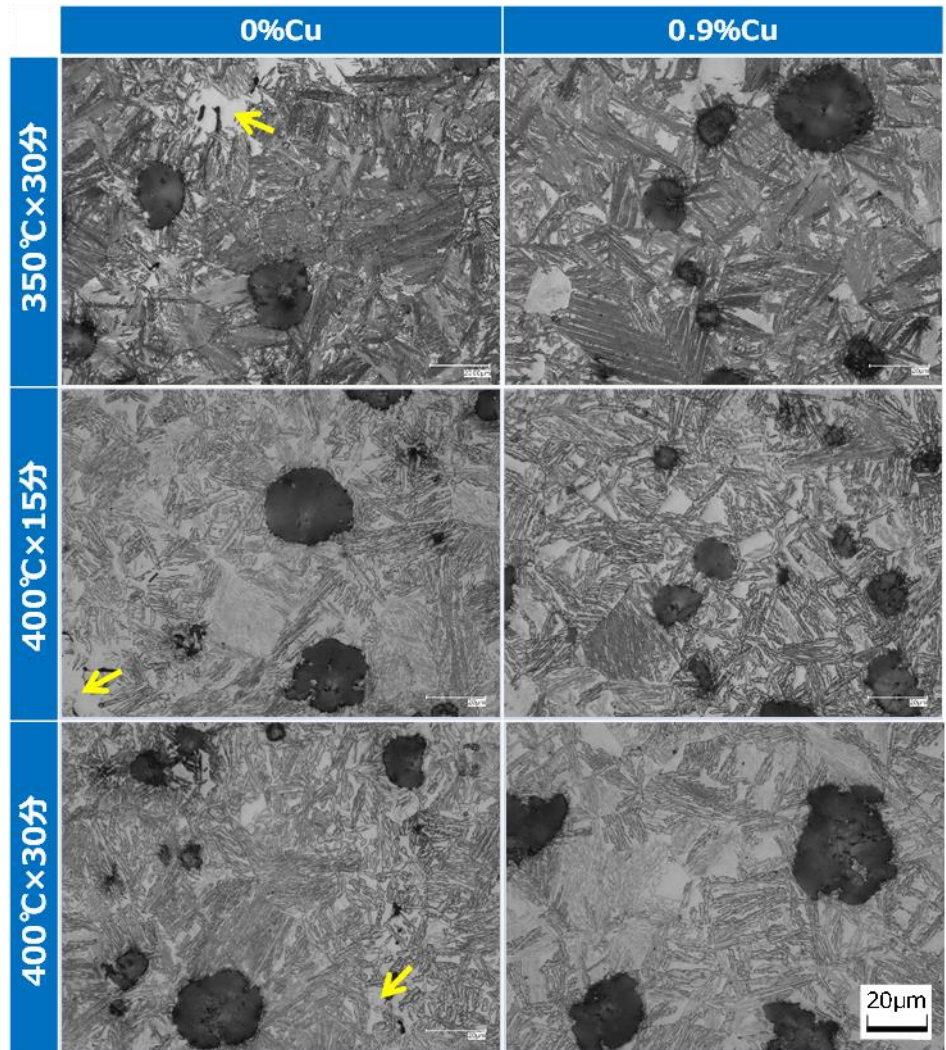


図 3 衝撃試験片の代表的な組織写真

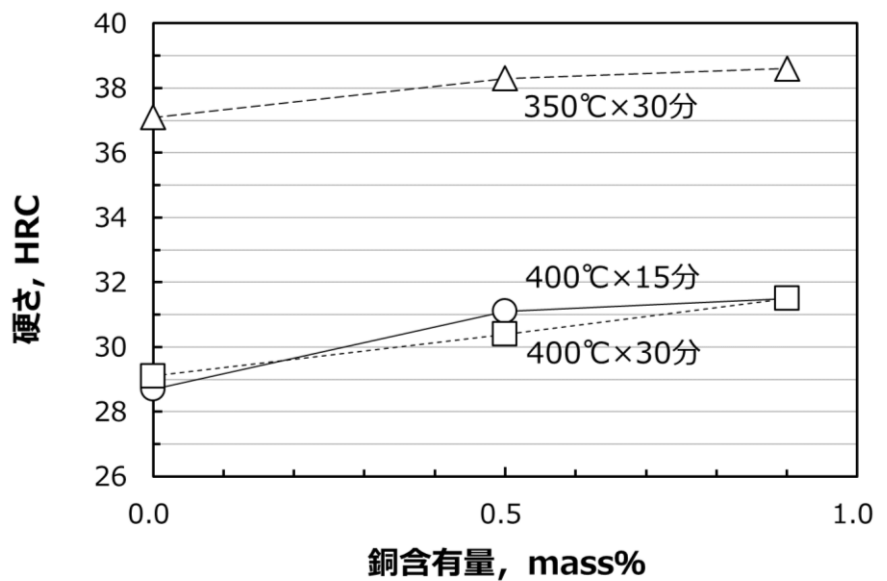


図 4 ロックウェル硬さに及ぼす銅含有量の影響

度の違いほど顕著でなく、また保持時間による差は認められなかった。

図5に衝撃吸収エネルギーに及ぼす銅含有量の影響を示す。衝撃吸収エネルギーは、いずれの熱処理条件においても銅含有量の増加に伴い向上し、処理温度400℃で保持時間15分の条件において、最大値145 J/cm²を示した。

衝撃吸収エネルギーは処理温度400℃よりも350℃の方が低かったが、これはまず図3より350℃で30分の組織には、靱性を損なう塊状の不安定オーステナイトが400℃よりも多く存在すること、また350℃のベイナイト組織は図3及び図4より針状の硬い下部ベイナイトが主であり、針状組織は先端に応力集中しやすく、き裂の起点となりやすいため、羽毛状の上部ベイナイトよりも硬くてもろい組織であるためと考えられる。

また処理温度400℃において、衝撃吸収エネルギーは保持時間15分よりも30分の方が低かった。これは図3より、保持時間の経過に伴いベイナイト組織が粗大に成長し、き裂が伝播しやすくなったためと考えられる。

また衝撃吸収エネルギーは、いずれの熱処理条件においても銅含有量の増加に伴い向上した。これは図3より、銅含有量の増加に伴い不安定オーステナイトが減少したことと、銅により鉄基地が固溶強化されたためと考えられる。

4 結 言

銅含有量を0から0.9%まで変化させた球状黒鉛铸铁をオーステンパ熱処理し、衝撃特性に及ぼす銅の影響について調べた。得られた結果は以下のとおり。

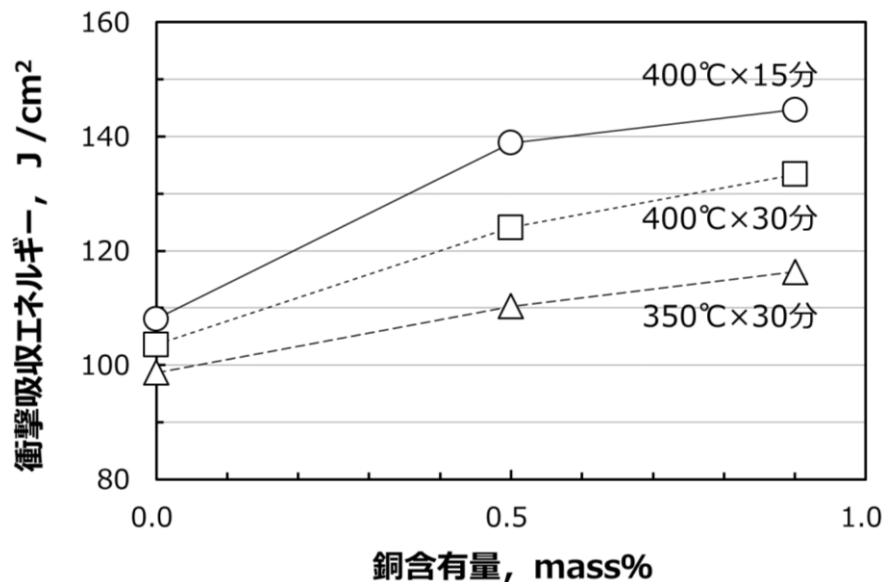


図5 衝撃吸収エネルギーに及ぼす銅含有量の影響

- (1) 不安定オーステナイトは、処理温度が高くなるほど減少した。また処理温度350℃においては、保持時間が長くなるほど、銅含有量が増加するほど減少した。
- (2) ベイナイトのサイズは、保持時間が長くなるに従い粗大になった。
- (3) 硬さは、銅含有量の増加に伴い増加した。また処理温度350℃の方が400℃より硬かった。
- (4) 衝撃吸収エネルギーは、銅含有量の増加に伴い向上し、銅含有量0.9%、処理温度400℃、保持時間15分の条件において、最大値145 J/cm²を示した。

文 献

- 1) 青山正治、小林敏郎、松尾國彦：鑄物62(1990)7、517
- 2) 矢島善次郎、岸陽一、清水謙一、望月栄治、吉田敏樹：鑄造工学77(2005)7、445
- 3) 柳沢平、矢野哲夫、福原宏之：熱処理28(1988)5、314
- 4) 邹莹、駒田賢一、中江秀雄：鑄造工学83(2011)7、378