

白鑄鉄の鑄造割れ感受性に及ぼす硫黄の影響*

高川 貫仁**

白鑄鉄の割れ抑制のための鑄鉄組成を検討するため、白鑄鉄の割れ感受性に及ぼす硫黄含有量の影響をリング状の枠形試験片を用いて調べた。その結果、炭素 4 mass%では硫黄含有量の増加に伴いリングの歪みは増加して、割れ感受性は高くなり、炭素 3 mass%では逆に小さくなった。リングの歪みはセメントイト面積率が増加するに伴い直線的に大きくなる傾向を示した。そのため、炭素 4 mass%において硫黄含有量の増加に伴いリングの歪みが大きくなった原因は、硫黄含有量の増加に伴いセメントイト量が増加したためと考えられた。

キーワード：白鑄鉄、鑄造割れ感受性、硫黄

Effect of Sulfur on Casting Crack Susceptibility in White Cast Iron

TAKAGAWA Takahito

Key words : white cast iron, casting crack susceptibility, Sulfur

1 緒言

岩手県の伝統的工芸品である南部鉄瓶では、高付加価値製品の一例として、日本古来の製鉄技術「タタラ製鉄」で採れた鑄鉄地金（和銑：わずく）を原料とした南部鉄瓶の製造を行っている。和銑はシリコン量が低いいため白銑組織になりやすい。白銑は、一般的な黒鉛が晶出しているねずみ鑄鉄と比較して、振動を吸収しにくいため、たたくと音色が長く続き、また錆びにくいという特徴がある。しかし、ねずみ鑄鉄と比較して黒鉛を晶出しないため、凝固収縮量が大きくなる。そのため和銑を原料として鉄瓶をつくる場合、割れることがある。割れ防止のためには、鑄鉄組成の検討が必要である。そこで本研究では、白鑄鉄の鑄造割れ感受性に及ぼす硫黄含有量の影響について調べた。

2 実験方法

本実験の鑄鉄の目標組成及び炭素当量を表 1 に示す。炭素は 3、4 mass%の 2 水準、シリコンは 0.5 mass%、硫黄は 0、0.2、0.4 mass%の 3 水準とし、これらを組み合わせた試料を作製した。炭素当量(CE)は、まず菅野らによる亜共晶から共晶にかけての液相線から求めた炭素当量の計算式①¹⁾より算出し、炭素 4 mass%、硫黄 0.4 mass%においては共晶成分(4.32 mass%C)を超えたため、本組成のみ、過共晶組成の炭素溶解度曲線から求めた計算式②²⁾より算出した。なお式①の CE_L は亜共晶から共晶にかけての液相線から求めた式であることを意味する。

$$CE_L = [\%C] + 0.23[\%Si] - 0.03[\%Mn] + 0.32[\%P] + 0.64[\%S] + 0.02[\%Ni] + 0.06[\%Cr] \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

$$CE = [\%C] + 0.31[\%Si] + 0.33[\%P] + 0.4[\%S] - 0.027[\%Mn]$$

.....②

実験は、黒鉛るつばに電解鉄と黒鉛を所定量配合し高周波誘導炉で溶解し、フェロシリコンと硫化鉄を添加した後、炭素 3 mass%の場合は 1480°C、炭素 4 mass%の場合は 1370°Cで炉から取り出し、CO₂型による鑄造割れ感受性評価試験片鑄型に注湯した。

鑄造割れ感受性評価には図 1 に示すリング状枠形試験片を用い、感受性の評価は図 2 に示す方法によりリング

表 1 鑄鉄の目標組成及び炭素当量

	C mass%	Si mass%	S mass%	炭素当量
3%C- 0%S	3	0.5	0	3.12
3%C-0.2%S			0.2	3.24
3%C-0.4%S			0.4	3.37
4%C- 0%S	4		0	4.12
4%C-0.2%S			0.2	4.24
4%C-0.4%S			0.4	4.32

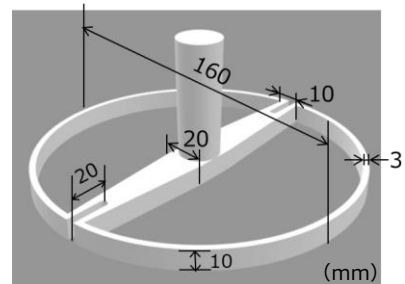


図 1 リング状枠形試験片(鑄造割れ感受性評価試験片)

* 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

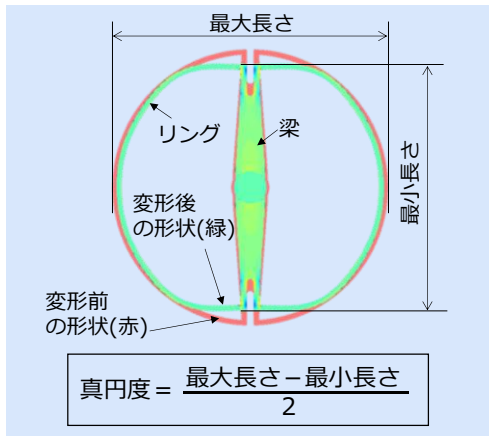


図2 リング状棒型試験片からの真円度の求め方

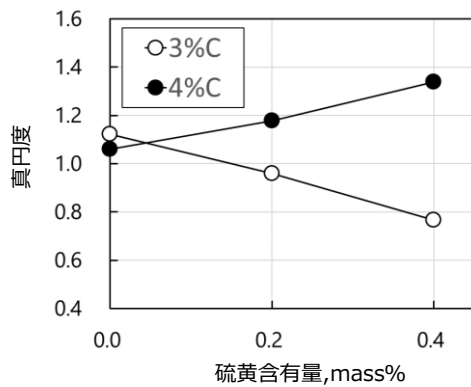


図3 真円度に及ぼす炭素及び硫黄含有量の影響

の真円度を求めて定量的に評価した。試験片は湯口と梁、リングから成り、湯口から注湯すると、はじめにリング

部分から凝固し、次いで梁の部分が凝固する。そのため先に凝固したリング部分は梁の凝固収縮により梁方向に歪む。真円度は、梁に垂直方向のリング径と梁方向のリング径の差を2で除した値とした。リングの歪が大きいほど真円度の値は大きくなり、真円度が大きいほど割れ感受性が高いと評価した。

組織観察は、リングの出来るだけ梁から離れた部分から切り出した断面を観察し、画像解析によりセメント界面積率を求めた。

リング状棒型試験片は各組成においてn3で採取し、組織観察は一つの試験片から1000倍で3視野観察し画像解析を行った。

3 結果及び考察

図3に真円度に及ぼす炭素及び硫黄含有量の影響を示す。炭素4 mass%の場合、真円度は硫黄含有量の増加に伴い大きくなり、ひずみが大きくなっている。炭素3 mass%の場合、逆に硫黄含有量の増加に伴い真円度は小さくなった。

図4に撮影倍率200倍の組織写真、図5に撮影倍率1000倍の組織写真を示す。図5の組織中、白い組織が共晶セメントで、灰色の組織はパーライトであるが、パーライトは共析温度以上でオーステナイトであった組織であり、本報告では灰色の組織を便宜上オーステナイトと表記する。炭素3 mass%の金属組織は、デンドライト状又は丸い塊状の初晶オーステナイトとレデブライト(セメントとオーステナイトの共晶組織)から成る。炭素3 mass%の場合、図4より、オーステナイトのデンドライト・セル集団(同じ方向に成長しているデンドライトの集団)は硫黄含有量の増加に伴い増加した。また図5

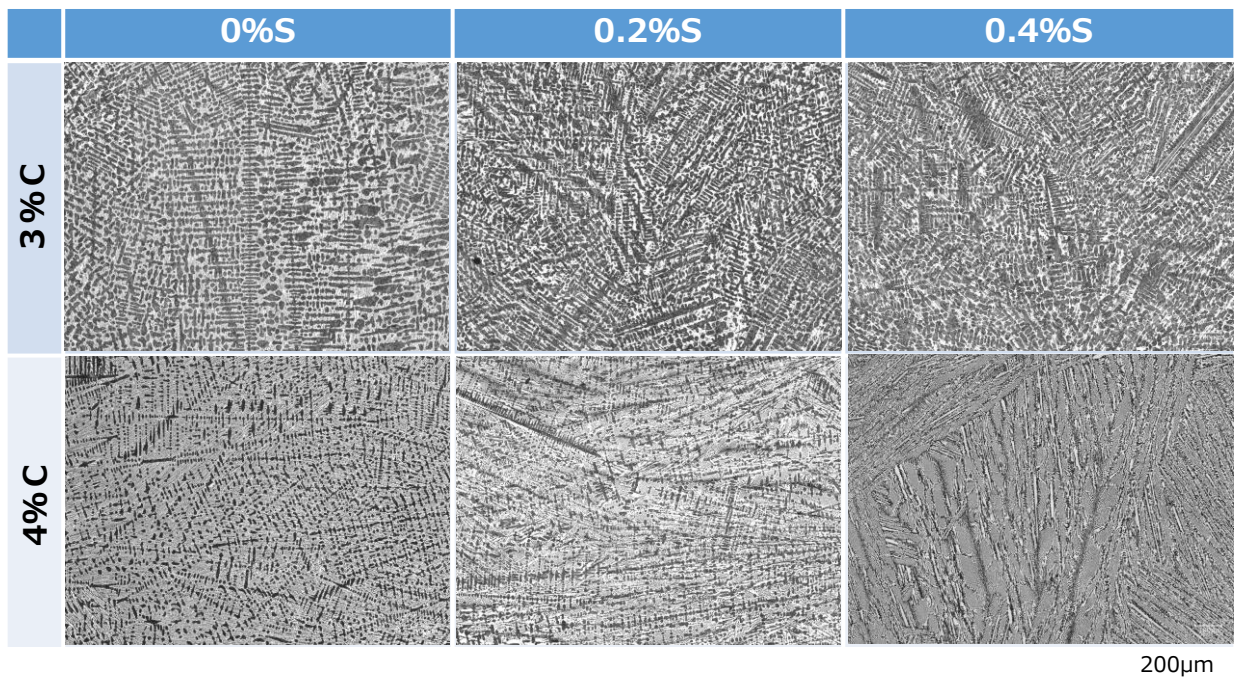


図4 光学顕微鏡写真 (撮影倍率 200 倍)

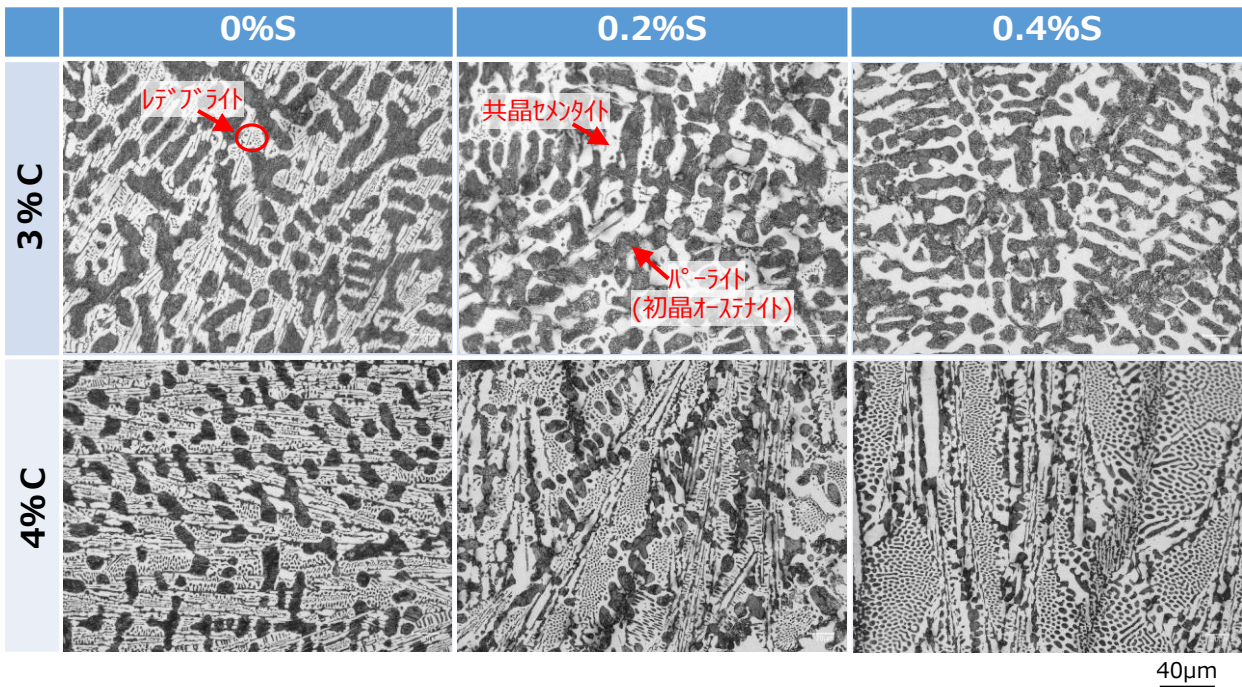


図5 光学顕微鏡写真（撮影倍率 1000 倍）

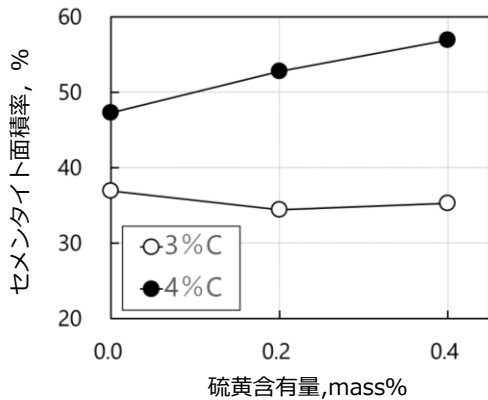


図6 セメントライト面積率に及ぼす硫黄含有量の影響

より初晶のデンドライトは硫黄含有量の増加に伴い、細かくなった。これは大城らのクロム 1 mass% を含有する亜共晶白鑄鉄における報告とも一致する³⁾。炭素 4 mass% の場合、図 5 より、硫黄含有量の増加に伴い初晶オーステナイトは減少し、0.4 mass% 硫黄では初晶オーステナイトは観察されず、いずれの図からも板状の初晶セメントライトが若干観察された。炭素量の影響では、炭素 3 mass% から 4 mass% に増加することにより、初晶オーステナイトは減少した。これは、表 1 のとおり炭素当量が、増加するためと考えられる。

次に 1000 倍の組織写真を画解析ソフトにより 2 値化し、白色のセメントライト面積率を求めた。図 6 にセメントライト面積率に及ぼす硫黄含有量の影響を示す。炭素 4 mass% の場合、セメントライト面積率は硫黄含有量の増加

に伴い増加した。炭素 3 mass% の場合は、硫黄含有量に増加に伴い、セメントライト面積率は若干減少したがほぼ一定であった。

次に、Fe-C 系平衡状態図から、この原理により表 1 の炭素当量におけるセメントライト/オーステナイト質量比を求め、そこからセメントライトの密度を $7.66 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ⁴⁾、オーステナイトの密度を $7.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ⁴⁾ としてセメントライト面積率を求めた。図 7 に、平衡状態図から求めた共晶セメントライトの面積率及び組織写真から求めた共晶セメントライト面積率と硫黄含有量の関係を示す。図より、炭素 3 mass% の場合、計算によるセメントライト面積率は硫黄含有量の増加に伴い増加するが、実際のセメントライト面積率は硫黄含有量が増加してもほぼ一定であり、計算値と実測値は異なる傾向を示した。炭素 4 mass% の場合は、計算及び実測のセメントライト面積率は、共に硫黄含有量の増加に伴い増加し同様の傾向であった。また計算値と実測値の差は硫黄含有量の増加に伴い大きくなった。この要因については、大城らによれば硫黄はレデブライトの晶出温度範囲を広くするなどの理由により共晶コロニーは粗大化するとの報告もあり³⁾、本実験において、硫黄含有量の増加に伴い共晶セメントライトが成長しやすい環境になり、セメントライト面積率が高い炭素 4 mass% において、セメントライト面積率は硫黄含有量の増加に伴い計算値よりも大きくなったと考えられた。

炭素 4 mass% において、図 3 及び図 6 より、真円度に及ぼす硫黄含有量の影響とセメントライト面積率に及ぼす硫黄含有量の影響はほぼ同じ傾向を示した。そこで、炭

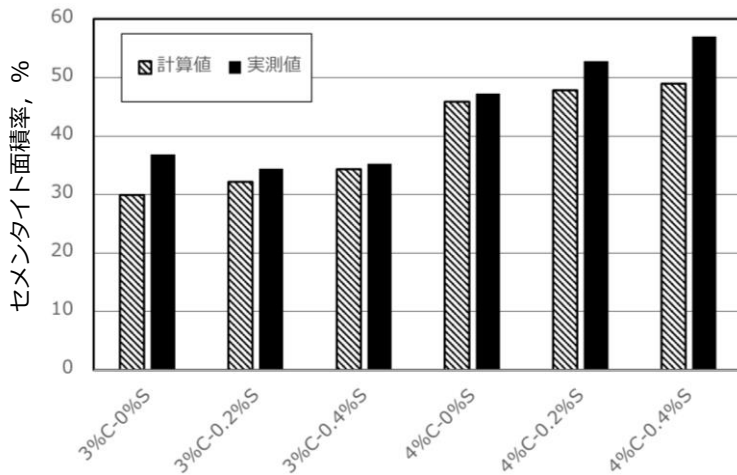


図7 平衡状態図から求めた共晶セメンタイト面積率及び組織写真から求めた共晶セメンタイト面積率と硫黄含有量の関係

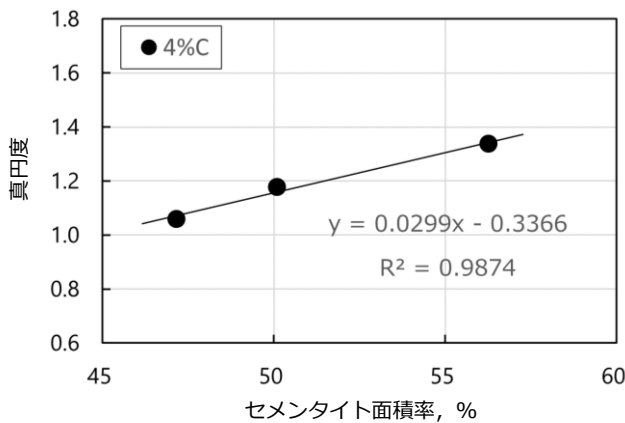


図8 炭素4 mass%における真円度に及ぼすセメンタイト面積率の影響

素4 mass%における真円度に及ぼすセメンタイト面積率の影響を図8に示す。真円度はセメンタイト面積率の増加に伴い高くなる傾向にあり、最小二乗法により求めた回帰直線の寄与率は0.99であり、高い相関が得られた。鋳型原型作製時の伸び尺を参考に鋳鋼と白鋳鉄の収縮率を比較すると、収縮率は鋳物の形状や大きさ、肉厚によっても異なるため単純に比較は出来ないが、鋳鋼(肉厚10 mm以上の一般)の伸び尺が16/1000⁵⁾、白鋳鉄は18/1000~25/1000⁶⁾であり、白鋳鉄の方が鋳鋼よりも収縮率は大きい。このことから、フェライトやパーライトなどの鉄基地よりもセメンタイトの方が収縮率は大きいと考えられ、それ故に本実験において、セメンタイトの面積率が増えると収縮率も大きくなり真円度が大きくな

ったと考えられた。

また機械的性質の観点から、谷口によれば炭素含有量の増加によりレデブライト量が増加すると圧延性が低下し、共晶組成に近くなり全体がほぼレデブライトになると、圧延性は急激に悪くなるという報告がある⁷⁾。つまりレデブライトが増えると脆くなり、じん性は低下する。そのため、凝固後の残留応力が同程度の場合、炭素含有量が多いほど、また、硫黄含有量が多いほどレデブライトは増加して、割れやすくなると考えられる。

本実験において、炭素3 mass%の場合、真円度は硫黄含有量の増加に伴い小さくなったが、この要因についてはセメンタイト面積率とは相関は得られず今後さらなる検討が必要である。

4 結 言

- (1) 真円度は、炭素4 mass%では硫黄含有量の増加に伴い大きくなり、凝固時に生じる収縮による歪は大きくなった。炭素3 mass%では逆に小さくなった。
- (2) セメンタイト面積率は、炭素4 mass%の場合、硫黄含有量の増加に伴い増加した。炭素3 mass%の場合は硫黄含有量に関係なくほぼ一定であった。
- (3) 炭素4 mass%において、真円度はセメンタイト面積率が増加するに伴い直線的に大きくなる傾向を示し、寄与率0.99の高い相関が得られた。
- (4) 炭素4 mass%において硫黄含有量の増加に伴い真円度が高くなった原因は、硫黄含有量の増加に伴いセメンタイト量が増加したためと考えられた。

謝 辞

本研究は、岩手大学大学院総合科学研究科 金型・鋳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 吉田健吾氏ならびに大学院 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) 菅野利猛, 岩見祐貴, 姜一求: 鋳造工学 91(2019)87
- 2) 日本鋳造工学会: 鋳造工学便覧 (2002)
- 3) 大城桂作, 松田公扶: 鋳物 84(1976)16
- 4) 素形材センター: 鋳鉄の生産技術 改訂版 (1998)
- 5) 日本鋳物協会: 鋳物便覧 改訂3版 (1973)
- 6) 鋳造技術講座編集委員会: 特殊鋳鉄鋳物 (1967)
- 7) 谷口希一: 鋳物 47(1975)320