

オーステナイト鋳鉄の磁気特性に及ぼす各元素含有量の影響*

池 浩之**、高川 貫仁**、岩清水 康二**
橋本 修一***

オーステナイト鋳鉄 (JIS FCANiCr202) は、ニッケル、クロム、銅、シリコンなどの元素を含んでおり、耐食性に優れ、非磁性である。しかしこれらの元素の含有量を変化させると、耐食性や磁気特性も同時に変化する。本研究では、オーステナイト鋳鉄の各元素含有量の変化が合金組織と透磁率へ及ぼす影響について調べた。その結果、ニッケルやコバルトは含有量を増加させると、耐食性と透磁率が向上した。しかし、シリコン量を増加させると、耐食性や透磁率を下げる働きをすることが分かった。

キーワード：オーステナイト鋳鉄、合金組織、透磁率、耐食性、ニッケル

Effect of content of the each element on the magnetic characteristic of the austenitic cast iron

IKE Hiroyuki, TAKAGAWA Takahito, IWASHIMIZU Kouji
and HASHIMOTO Shuichi

The austenitic cast iron (JIS FCANiCr202) contains elements such as the nickel, chrome, copper, silicon, is non-magnetism and is excellent in corrosion resistance. However, the corrosion resistance and the magnetic characteristic of the austenitic cast iron are changed in agreement with changing the contents of the elements. In this study, effect of change of the content of each element on the microstructure, on the corrosion resistance and on the magnetic permeability of the austenitic cast iron was examined. As a result, corrosion resistance and magnetic permeability have improved when the nickel and cobalt increased. However, it has been understood that when the amount of silicon has been increased, corrosion resistance and magnetic permeability have been lowered.

key words: austenitic cast iron, microstructure, magnetic permeability, corrosion resistance, nickel

1 緒言

一般に鉄系材料は錆びやすい金属であることがよく知られている。しかし、鉄、クロムそしてニッケルを主成分とするステンレス鋼製の鍋や食器は錆にくい。その理由は、ステンレス鋼は、自己保護性が非常に強い含水酸化物超薄膜（不動態皮膜（厚み 5nm 以下））を形成するためである¹⁾。このステンレス鋼の不動態皮膜は、きわめて広範囲の環境条件下で安定であり、その修復能力も優れる。そしてステンレス鋼に含まれるクロムが、不動態皮膜形成に必要な元素(12mass%以上)であり、クロム量が多いほど不動態皮膜を形成し易くなる。そしてこれにニッケルを加えることで不動態皮膜形成はさらに促進する¹⁾。

ところで、鋼より炭素が多い鋳鉄の場合、クロムを多く含有する高クロム鋳鉄 (Cr : 12~35mass%) の耐食性はステンレス鋼に匹敵する。しかしクロムを多く含む高クロム鋳鉄は、炭素とクロムが炭化物を形成し、組織中に黒鉛が晶出せず白鉄となる。この高クロム鋳鉄は、非常に硬く延性が低いため、特に耐摩耗材料として利用されている²⁾。

一方、黒鉛が晶出した耐食用の鋳鉄としては、ニッケルを 12~36%含むオーステナイト鋳鉄がある。このオーステナイト鋳鉄は、ニッケルのほか少量のクロム、銅などを添加することにより、室温でのオーステナイト存在領域が拡大し、耐食性が向上する³⁾。しかし組織中に黒鉛が晶出するため、黒鉛と基地との隙間から

* 事業名「共同研究事業」
** 材料技術部
*** (株)トシ・コラボレーション

腐食が発生しやすく、一般的にステンレス鋼より耐食性が劣る。また、オーステナイト 鋳鉄はクロムを多く添加すると黒鉛が 晶出せず白鉄化し脆くなる。そのため、炭化物促進元素であるクロムやマンガンなどは白鉄化しない程度に制限するのが普通である³⁾。このオーステナイト 鋳鉄は JIS G 5510 で規格化され、耐食用、耐熱用、非磁性、低膨張用など用途によって組成や黒鉛形状が異なる。そのほかのオーステナイト 鋳鉄の特徴として、ニッケル含有量が多いため、オーステナイト領域が室温で安定化し非磁性となる組成がある。そのためこの非磁性組成のオーステナイト 鋳鉄で鍋などを作製した場合、渦電流が発生せず電磁調理器による加熱が出来ない場合がある。そこで、オーステナイト 鋳鉄製鍋を電磁調理器などの加熱用途で用いる場合、透磁率を高くする必要が生じる。

そこで本研究ではオーステナイト 鋳鉄の主要元素であるニッケル、クロム、銅、シリコンそしてコバルトを加えた各元素の含有量が、オーステナイト 鋳鉄の合金組織や磁性などへ及ぼす影響について調べた。

2 実験方法

溶解原料は、高純度鉄鉄、電解鉄、電解マンガン、電解ニッケル、電解クロム、高純度シリコン、高純度銅、高純度アルミニウムそして電解コバルトを用いた。そして JIS G 5510 で最も多く利用されている片状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄 (FCANiCr 202) と球状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄 (FCDANiCr 202) の試験片を作製し、組織観察と透磁率の測定を行った。片状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄 (以下: FCA) の試験片は、約 8kg の原料を #10 黒鉛レツポに入れ、高周波誘導炉にて最高温度 1550℃ で溶解後、フェロシリコン (Fe-75%Si) 0.3% 添加による接種を行い、約 1450℃ の温度で試験片鋳型に注湯して作製した。この時同時に分析用試験片も採取した。球状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄 (以下: FCAD) は、同様に溶解した後 Ni-16%Mg 合金による球状化处理 (合金に全体対する Mg 添加量 0.13%) を行った後、フェロシリコンによる接種を行い、約 1450℃ の温度で鋳型に注湯して作製した。また FCAD では、ニッケル量を 30, 35, 40% と変化させた時の合金組織と透磁率の変化を調べた。そしてクロム、銅、シリコン、アル

表1 原料調整した各試験片の成分と各元素の影響を調べるために変化させた元素の量

	C	Si	Mn	Ni	Co	Cu	Al	Cr
片状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄(FCANiCr 202)	2.8	2.0	1.0	20	—	0.2	—	2.0
球状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄(FCADNiCr 202)	2.8	2.0	1.0	20	—	0.2	—	2.0
ニッケル量の影響	2.3	1.5	1.0	30,35,40	—	0.2	—	2.0
クロム量の影響	2.3	1.5	1.0	30	—	0.2	—	5,10,15
銅量の影響	2.3	1.5	1.0	30	—	0,1,5,10	—	—
シリコン量の影響	1.6	2,3,4	0.5	30	—	0.2	—	1.0
コバルト量の影響	1.2	4.0	0.5	30	2,5,10	0.2	0.1	1.0

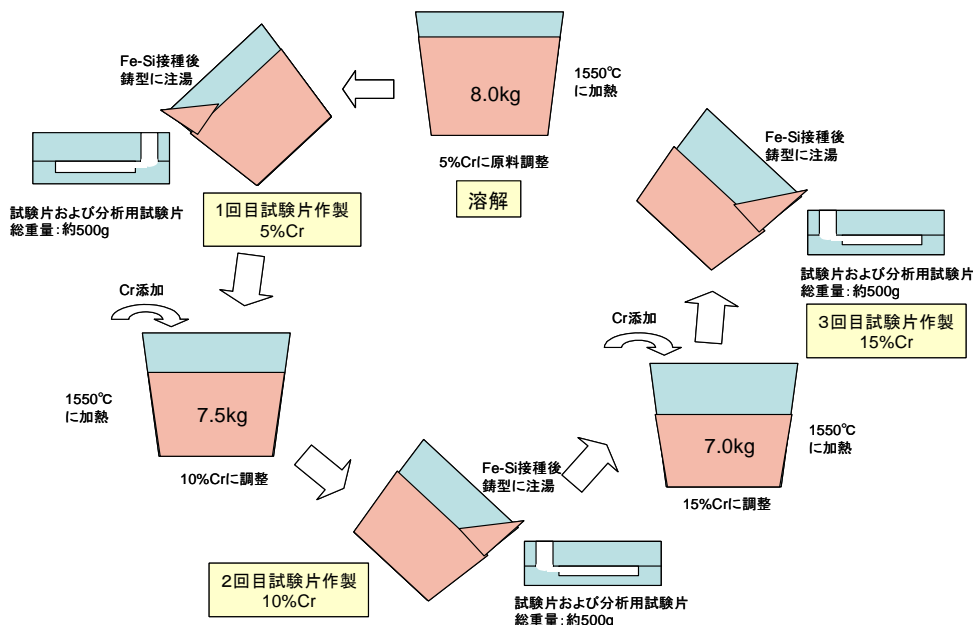


図1 クロム量を変化させた片状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄試験片の作製方法

ミそしてコバルトなどの含有量の 影響は FCA で 調べた。
表 1 に FCA 各試験片の 原料調整した 成分をまとめて 示した。また **図 1** には、FCA 試験片の 作製方法を、クロム 量を変化させた 例で示した。まず 5%Cr 組成に 調整した FCA を 8kg 溶解した 後、試験片および 分析試験片 鋳

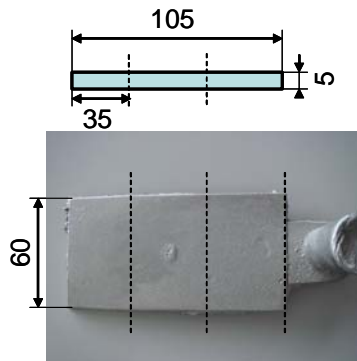


図2 作製した試験片の外観と寸法

型に注湯して 5%Cr の 組成の 試験片を 作製した。その後 再度加熱して 電解クロムを 添加し、10%Cr 組成に 調整し、再度 鋳型に注湯して 10%Cr 組成の 試験片および 分析用試験片を 作製した。その後 15%Cr 組成の 試験片も 同様な方法で 作製した。このような 方法で作製した 試験片 (**図 2**) を用いて、光学顕微鏡による 組織観察と 透磁率測定装置 (愛知製鋼製) による 透磁率測定を行 った。

3 実験結果および考察

3-1 片状黒鉛系および球状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄の光学顕微鏡組織

図 3 には、FCANiCr202 および FCADNiCr202 の 光学顕

微鏡組織を 示した。組織観察試験片は 5%ナイトル (5% 硝酸アルコール) で 約 30s 腐食した 時の組織を 示した (組織観察時の 腐食条件は 以下同様)。いずれの 組織中にも 黒鉛とオーステナイト (γ) 相 相して 共晶炭化物が 確認された。共晶炭化物は デンドライトの 間隙に 晶出しており、FCA の 場合は 比較的大きく 成長し、黒鉛 と黒鉛を 結ぶように 晶出した。FCAD の 場合は、細かい 共晶炭化物が 集合して デンドライトの 間隙を 埋め尽く しており、炭化物の 晶出量も FCA より 多かった。各 鋳鉄の 蛍光 X 線分析結果を **表 2** に 示したが、FCA と FCAD では 球状化処理に 伴う マグネシウム の 有無による 成分の 相違のみで、ほかの 成分は ほぼ 同じである。しかし 炭化物晶出量や 形状が 異なる 理由は、黒鉛の 晶出方法 や 冷却速度の 影響と 考えられた。すなわち、FCAD の 冷却速度が 速いため、共晶炭化物の 寸法も 小さく なる と 考えられた。

3-2 球状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄の合金組織と 透磁率に及ぼすニッケル量の 影響

次に FCAD の Ni 含有量 を 変化させた ときの 合金組織 を **図 4** に 示した。この 時、溶解原料は ニッケルが 黒鉛化 促進元素である ことと、JIS FCDANiCr303 を 参考にして、炭素量を 2.3%、シリコン 量を 1.5% とし、ニッケル 量を 30%、35%、40% と 変化させた。明らかに **図 3** の 20%Ni 合金に 比較して、30%Ni 合金の 炭化物晶出量 は 減少し、ニッケル 含有量が増加する ほど炭化物は 減少する 傾向にある ことが 確認された。従って ニッケル 量が増加する ほどナイトルによる 腐食は 進行しにく かった。また、合金中 に 晶出する 黒鉛量は ニッケル 含有量が増える ほど 増加した。これらの 現象は、オーステ

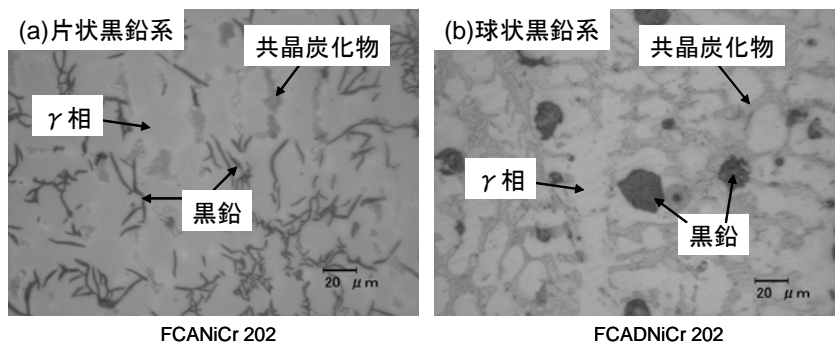


図3 オーステナイト 鋳鉄の 光学顕微鏡組織 (C:2.8, Si:2.0, Mn:1.0, Ni:20.0, Cu:0.2, Cr:2.0)

表2 片状系および球状系オーステナイト 鋳鉄の 蛍光 X 線分析結果

	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	Mg
片状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄(FCANiCr 202)	—	2.38	1.00	19.3	0.196	2.13	—
球状黒鉛系オーステナイト 鋳鉄(FCADNiCr 202)	—	2.14	1.02	20.25	0.230	2.15	0.017

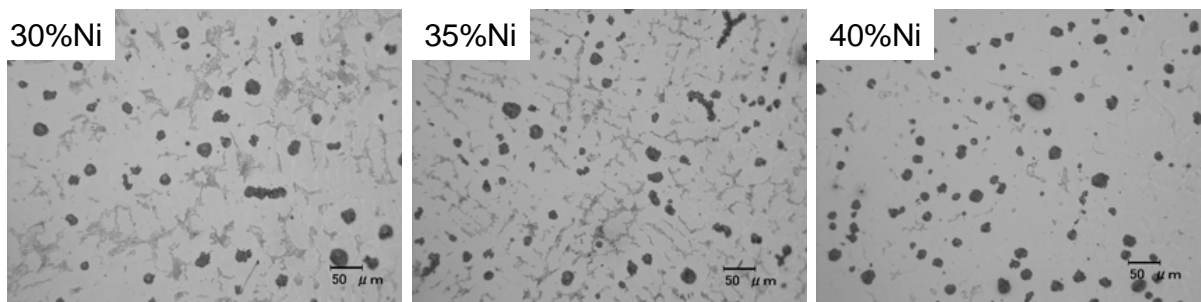


図4 球状黒鉛系オーステナイト鑄鉄の光学顕微鏡組織に及ぼすニッケル含有量の影響 (C:2.3, Si:1.5, Mn:1.0, Cu:0.2, Cr:2.0)

表3 ニッケル量を変化させた球状黒鉛系オーステナイト鑄鉄の蛍光X線分析結果

ニッケル量	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	Mg
30%Ni	—	1.47	1.03	30.82	0.218	2.21	0.122
35%Ni	—	1.46	1.03	35.57	0.217	2.21	0.158
40%Ni	—	2.07	1.04	39.71	0.215	2.10	0.406

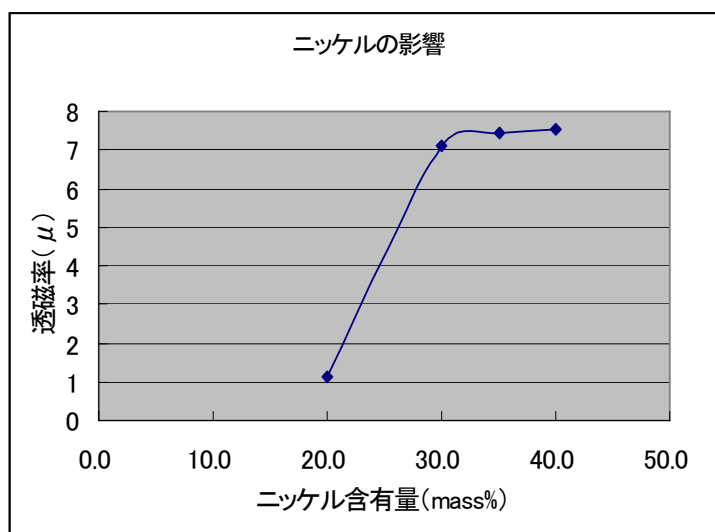


図5 球状黒鉛系オーステナイト鑄鉄の透磁率に及ぼすニッケル含有量の影響

ナイト鑄鉄中のニッケルが増加するほど Cr, Cu, Mn などの元素のオーステナイト中への固溶量が増加したため、金属間化合物や炭化物が減少すると考えられた。またニッケルは黒鉛化促進元素であるため、黒鉛のオーステナイト中への固溶量はほとんど変化しない。しかし Cr, Mn などの炭化物生成元素がオーステナイト中に固溶して減少するため、黒鉛は炭化物として晶出できず、黒鉛のまま晶出する。そのため、ニッケル含有量が増加するほど組織中の黒鉛量も増加したと考えられた。

表3には、ニッケル量を変化させた試験片の蛍光 X 線分析結果をそれぞれ示した。ニッケル量は目標としたニッケル量に対し 0.5%未満で成分調整が出来た。しかしシリコン量は 40%Ni で目標値に対して 0.5%以上も誤差が生じた。またマグネシウム量も 40%Ni でのみ大

きく外れた。これは蛍光 X 線の測定精度も影響していると考えられた。また黒鉛量は蛍光 X 線では測定できないため空欄としたが、他の元素に関してはほぼ原料調整した数値が分析結果として得られた。

図5には、FCDAの透磁率へ及ぼすニッケル量の影響を示した。20%Niの結果は JIS の FCADNiCr202 の値である。この合金の透磁率 1.11 でほとんど磁性がないが、30%Niになると透磁率は 7.10 となり、強磁性体となることが分かった。また 35%、40%とニッケル量を増加させると若干透磁率は上昇するが、顕著な変化は無いことが分かった。

以上のことより、ニッケル量が増加するほど炭化物の固溶量が増加するため腐食しにくくなることが分かった。またニッケル含有量が増加すると透磁率は大きく変化し、30%Ni では強磁性体となることが分かった。

オーステナイト 鋳鉄の 磁気特性に 及ぼす各元素含有量の 影響

従ってニッケル量は 30%に固定して、以下 FCA で他の 元素の 影響を 調べた。

クロムは炭化物促進元素である。そのため 5%含有す だけで白鈍化が 強くなり、黒鉛の 晶出は 顕著に 少な

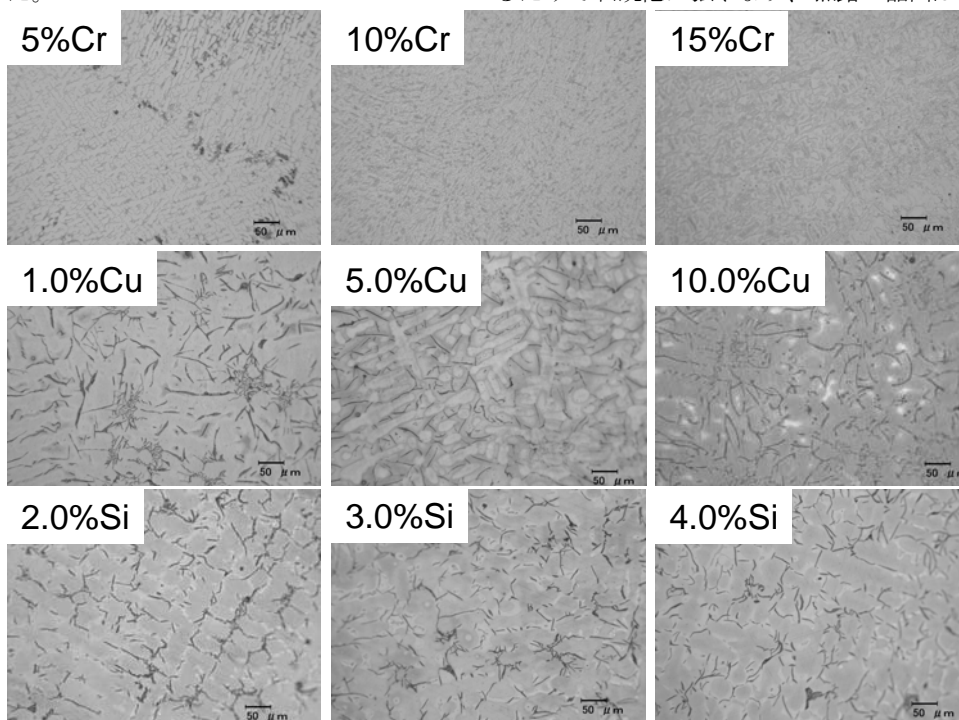


図6 片状黒鉛系オーステナイト鋳鉄の組織に及ぼすクロム、銅、シリコン含有量の影響

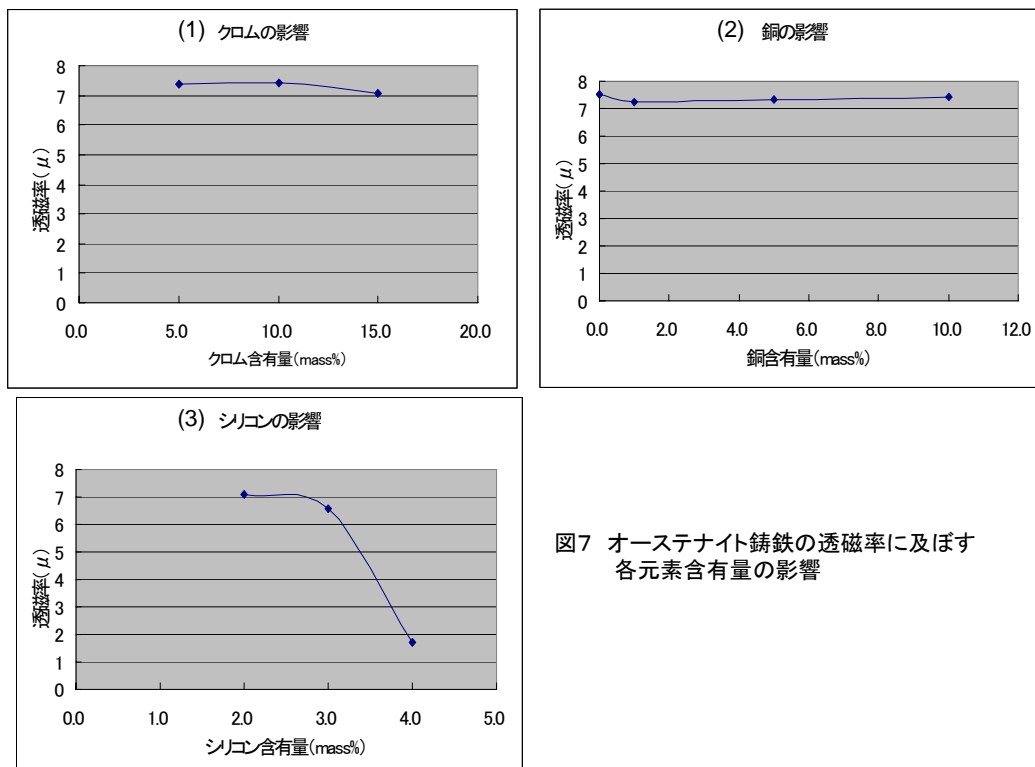


図7 オーステナイト鋳鉄の透磁率に及ぼす 各元素含有量の 影響

3-3 片状黒鉛系オーステナイト鋳鉄の合金組織と透磁率に及ぼす各元素量の影響

FCA でクロム、銅、シリコン量を変化させたときの 光学顕微鏡組織を 図6に、透磁率の測定結果を 図7に、そして各試験片の分析結果を 表4にそれぞれまとめて示した。

なくなった。そして 10%Crでは黒鉛は全く 晶出せず、炭化物が増加した。しかし、5%Crより 10%Crでは、炭化物の粒度が細くなるが、15%Crになるとまた炭化物粒度は若干大きくなるのが分かった。これは、10%Crの方が、5%Crよりデンドライト寸法が小さくなるため、10%Crでは共晶炭化物が細かく 晶出し、15%Crでは初晶

表4 クロム、銅、シリコン量を変化させたオーステナイト鋳鉄の蛍光X線分析結果

クロム量	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr
5%Cr	—	1.40	1.01	30.46	0.213	5.32
10%Cr	—	2.22	0.93	27.75	0.186	9.88
15%Cr	—	2.38	0.852	26.42	0.190	14.04

銅量	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr
1%Cu	—	2.65	1.00	29.19	1.00	0.02
5%Cu	—	1.90	0.947	28.69	4.76	0.016
10%Cu	—	1.89	0.91	27.22	9.36	0.015

シリコン量	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr
2%Cr	—	2.82	0.492	29.33	0.218	1.08
3%Cr	—	2.78	0.506	29.97	0.223	1.07
4%Cr	—	5.43	0.508	28.05	0.219	1.06

の炭化物も多く晶出するため、炭化物粒度が大きくなったと考えられた。またクロムは炭化物促進元素であるが、オーステナイト促進元素でもある。そのため多く含有すると非磁性体に近づくと考えられたが、図7(1)の結果より透磁率はほとんど変化しないことが分かった。さらに表4の結果より、クロム含有量は、目標値に対し、5%Cr→5.32%、10%Cr→9.88%、15%Cr→14.04%と1%以内の誤差範囲に収まっていることが分かった。しかし、クロム量が増加するほど、ニッケル量は30.46%Ni、27.75%Ni、26.42%Niと減少する傾向にあることも分かった。この現象は、銅やシリコンの場合もほぼ同じであった。

クロムを多く含むと白鈍化が著しいため、クロム量を0.02%に抑えて、次に銅の影響を調べた。これより銅は黒鉛化促進元素であるため、約10%まで含有しても黒鉛が組織中に多く晶出することが分かった。しかし銅の含有量が増加するほど、片状黒鉛は細くなる傾向にあることも分かった。そしてナイトルで腐食すると、この細くなった黒鉛の周囲に腐食され易い相が観察され、5%Cuではデンドライド間隙に、この腐食され易い相が多く観察された。そして10%Cuになると、ほとんどのマトリクス相がナイトルで腐食され、部分的に白く腐食されない相が観察された。通常銅を含むと鋳鉄は、保護層の形成により、希硫酸などに対する耐食性が向上すると云われている³⁾。しかし今回の結果では、銅を多く含むとマトリクスでは5%ナイトル(5%硝酸アルコール溶液)でも容易に腐食される傾向にあった。従って本研究の範囲では、銅の量を多くすると、耐食性は悪くなる傾向にあると考えられた。また図7(2)の透磁率測定結果より、銅を多く含んでも、磁性にはほとんど影響を及ぼさないことが分かった。

次にシリコン量の影響について調べた。この時クロムは白鈍化をなるべく抑えるために1.0%とし、上記の結果で銅量が増加すると、耐食性が劣化すると考えられたことから、銅の量は、FCANiCr202と同じ0.2%とした。またマンガンも白鈍化を促進し、耐食性を劣化させる傾向にあるため、ここでは0.5%とした。オーステナイト鋳鉄のシリコン量を4~5%と多くしたニクロシラル鋳鉄は、耐熱性と延性の高い合金で知られている³⁾。またシリコンを過剰に添加するとケイ化物が晶出して脆くなるため、ここでは2%~4%と変化させた。図6の組織観察の結果では、銅の場合と同様に、シリコン量が増加すると晶出する黒鉛の寸法が細くなる傾向にあり、マトリクス部は、ナイトルで容易に腐食されやすくなった。また、図7(3)の結果で、シリコン量が増加すると透磁率は顕著に低下することが分かった。これらの結果よりシリコン量の増加は、耐食性を劣化させ、透磁率も低下させるため、過剰な添加は避けた方が良いことが分かった。

3-4 片状黒鉛系オーステナイト鋳鉄の合金組織と透磁率に及ぼすコバルトの影響

これまでオーステナイト鋳鉄の主要元素であるニッケル、クロム、銅、シリコンなどの含有量が、合金組織や透磁率に及ぼす影響について調べてきた。その結果、ニッケルは増加するほど耐食性と磁気特性を向上させ、逆にシリコンは劣化させることが分かった。またクロムは、白鈍化を促進させ、銅は耐食性を低下させると考えられた。そこで、ニッケルと同じ鉄属元素で耐食性や透磁率を向上させると考えられるコバルト添加の影響について調べた。組織観察結果を図8に、そして透磁率の測定結果を図9に示した。尚ここではシリコン量は4%としてコバルト添加量が透磁率に及

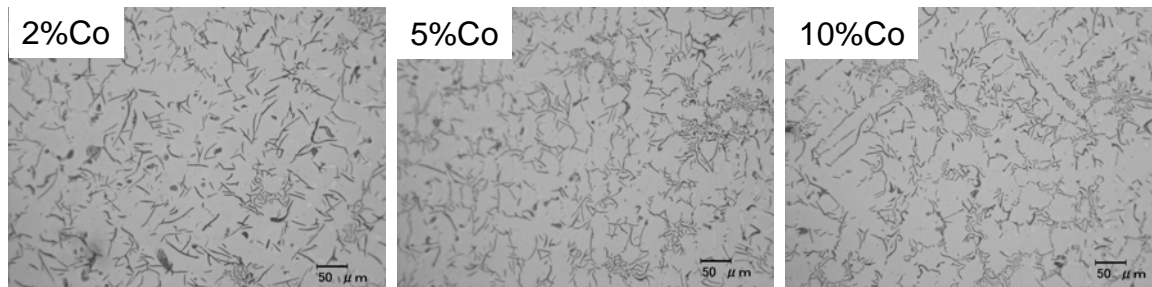


図8 片状黒鉛系オーステナイト鋳鉄の組織に及ぼすコバルト含有量の影響
(C:1.2, Si:4.0, Mn:0.5, Ni:30.0, Cu:0.2, Cr:1.0, Al:1.0)

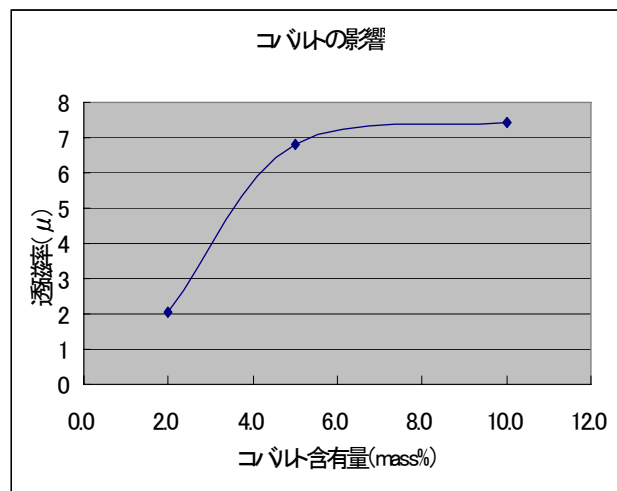


図9 片状黒鉛系オーステナイト鋳鉄の透磁率に及ぼすコバルト添加の影響
(C:1.2, Si:4.0, Mn:0.5, Ni:30.0, Cu:0.2, Cr:1.0, Al:1.0)

ぼす影響を調べた。その他ここで炭素量はさらに下げて 1.2%としたほか、耐食性を向上させるアルミニウムも 1.0%添加した。

図8の結果より、コバルトを添加した合金組織では、炭化物や金属間化合物は、いずれの組織中にもほとんど観察されず、基地部と黒鉛のみが観察された。また黒鉛の晶出量は 1.2%Cにも拘わらず比較的多く観察された。そしてコバルト添加量が増加するほど、黒鉛は細くなる傾向にあった。またマトリクス部は、ナイトルではほとんど腐食されなかった。これらは、ニッケルとコバルトの併せた量が 32%~40%と多く、クロム、シリコン、銅などの元素の固溶量も増加したこと、そしてアルミニウムを 1.0%添加したことなどから、耐食性がさらに向上したと考えられた。図9の透磁率の測定結果では、シリコンを多く含むため 2%Coでは 2.06と低かった透磁率も、コバルト量が増加するほど高くなり、10%Coでは 7.43にも上昇することが分かった。これらよりコバルトはニッケル同様に磁気特性を向上させ、耐食性も向上させる元素であることが分かった。今後は、以上の結果を基に、コストとの兼ね合いなども考慮しながら、耐食性が良く、透磁率も高く、機械的性質が優れ、湯流れ性や鋳造性にも優れる材質の検討を進め行く予定である。

4 結 言

オーステナイト 鋳鉄の 主要元素であるニッケル、クロム、銅、シリコンそしてコバルトを加えた各元素の含有量が、オーステナイト 鋳鉄の 合金組織や磁性などへ及ぼす影響について調べた結果以下の結論が得られた。

- オーステナイト 鋳鉄の 主要元素であるニッケルは、20%では非磁性体に近くなるが、30%以上に増加させると透磁率が上昇し、耐食性も向上した。
- クロムは炭化物促進元素であるため、5%以上添加すると白銹化が激しく脆くなる。また透磁率にはほとんど影響を及ぼさなかった。
- 銅は、5%以上添加するとマトリクスの耐食性を低下させ、また含有量が増加しても透磁率へはほとんど影響を及ぼさなかった。
- シリコンを増加させると透磁率を著しく低下させた。また組織中のマトリクスが腐食されやすくなった。
- コバルトの増加は、ニッケル同様に透磁率と耐食性を向上させることが分かった。

文 献

- 1) ステンレス鋼の選び方・使い方：日本規格協会、P

2) 特殊鋳鉄鋳物：鋳造技術講座編集委員会編,P186

3) 同上,P22