

機関番号：57101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560682

研究課題名(和文) 残留オーステナイト測定小型センサ及びシステムの開発

研究課題名(英文) Development of small sensor and system for measurement of retained austenite

研究代表者 笹栗 信也(SASAGURI NOBUYA)

久留米工業高等専門学校・材料工学科・教授

研究者番号：50215737

研究成果の概要(和文)：合金白鑄鉄は鑄造時あるいは焼入れ処理時に多量の残留オーステナイトが存在する。この残留オーステナイトは、製品の機械的性質や使用時の部材の欠損などに大きく影響するため、これを制御することは重要である。これまで、残留オーステナイト量の測定には、X線回折法によることが多く、簡便な測定法及びそのシステムの開発が望まれていた。そこで、本研究では熱処理を変えることにより、種々の残留オーステナイト量を含む合金白鑄鉄を作製し、それらの電磁現象の変化を測定することにより、非破壊的に鑄鉄中の残留オーステナイト量を測定する小型センサの開発を行うとともに、それを解析するシステムの開発を行った。開発した小型センサは約20Wmmx25Lmmx20Hmmで「コ」の字をしており、これに励起コイル及び検出コイルが巻かれている。励起コイルに交流電流を流し、そのときの検出コイルに得られた誘導電圧を検出する。残留オーステナイト量が異なると、誘導電圧が変化するので、これを解析することにより、材料内の残留オーステナイト量が評価できた。

研究成果の概要(英文)：Alloyed white cast irons produce a large amount of retained austenite when they are cast or quenched. The retained austenite affects severely the mechanical properties of the products and the defect of the parts. Therefore, the control of amount of retained austenite in the cast irons is very important. X-ray diffraction method has been used for a measurement of retained austenite. A development of a brief measurement method of retained austenite and its evaluation system has been expected. In this study, many samples including different amount of retained austenite for nine kinds of cast irons were prepared by changing the heat treatment condition and the change in the magnetic properties of these samples were measured nondestructively using a newly developed small sensor with the exciting coil and search coil measuring about 20^Lx25^Wx20^Hmm in size like a Japanese syllabary 「コ」. The amount of the retained austenite in the cast irons could be estimated by detecting the change of induced voltage associated with change in amount of retained austenite.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	1,600,000	480,000	2,080,000
21年度	1,100,000	330,000	1,430,000
22年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：金属材料

科研費の分科・細目：材料工学, 材料加工・処理

キーワード：非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

高合金材料では、残留オーステナイト (γ) の有無によって製品の性能が大きく左右される。そこで、製品中の残留オーステナイト量 (V_γ) を定量的に把握しておくことが望まれるが、高合金鋳鉄について簡便で非破壊的に V_γ を定量的に測定する方法及び装置がない。現在、 V_γ を定量的に測定する方法は、X線回折による場合が一般的であり、この場合試料を細かく切り出し、測定に長時間を要する。このため一般の工場で作製される製品の V_γ を測定することはできない。 V_γ によって、電磁気特性 (導電率、B-H 曲線) が変化するため、それらの特性差を測定することによって V_γ を定量的に測定できる可能性がある。残留 γ は非磁性であり、その周りを埋める基地は基本的にはフェライトで磁性を有することから、相互誘導型渦電流法によって電磁気特性を把握できれば、製品中の V_γ を、小型センサを用いて非破壊的に、定量的に測定できると考えられる。

2. 研究の目的

鋼および鋳鉄中の V_γ を非破壊的に、短時間で、定量的に計測できる小型センサおよびシステムの開発。

3. 研究の方法

供試材として、Mo 及び Ni を含有した 17%Cr 及び 26%Cr 鋳鉄、及び Cr, Mo, W, V をそれぞれ約 5%含有した多合金白鋳鉄、さらに球状黒鉛鋳鉄を用いて、それぞれの供試材について熱処理により V_γ を変化させた試料を作製する。このときの V_γ 量は X線回折法による。これらの試料について本研究で開発した小型センサを用いて、試料の磁気特性の変化を測定し、 V_γ との関係を求める。これにより、任意の試料の磁気特性を測定することにより含有される γ 量の測定が可能となる。

4. 研究成果

(1) 残留オーステナイト量を変化させた試料の作製

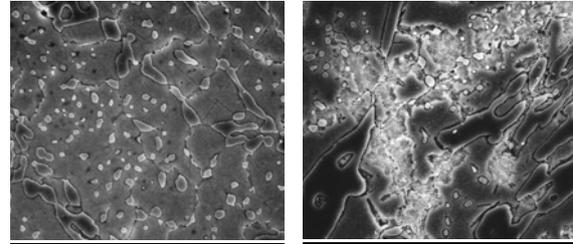
本研究では次の試料を用いた。

- ① 2.9%C-17%Cr-2%Mo, ② 2.9%C-17%Cr-2%Ni
- ③ 2.6%C-26%Cr ④ 2.6%C-26%Cr-2%Mo
- ⑤ 2.6%C-26%Cr-2%Mo ⑥ 2.7%C-26%Cr-2%Ni
- ⑦ 2.1%C-5%(Cr, Mo, W, V)-Fe
- ⑧ 2.4%C-5%(Cr, Mo, W, V)-Fe
- ⑨ 3.8%C-Fe (球状黒鉛鋳鉄)

これらの供試材に対し、鋳放し状態からの加熱処理、焼入れ焼戻し処理を行い、0~90%の残留オーステナイトを含有する試料を作製した。なお、このときの V_γ の測定は X線回折法による。

Fig. 1 に Mo を含有する 17%Cr 鋳鉄の焼入れ

時及び焼戻し時の金属組織の SEM 写真を示す。焼入れ時 (Fig. 1(a)) には、炭化物を取り囲む基地は、ほとんどが γ である。これを焼戻すことにより、Fig. 1(b) に示すように、残留 γ から炭化物の析出が起り、残留 γ の分解が生じ、残留 γ は減少する。合金元素量が多い場合には、炭化物の析出とその後のマルテンサイトへの変態によって、残留 γ が減少する。



(a) As-hardened V_γ :88%
(b) Heat-treated at 873K for 1×10^4 s V_γ :20%

Fig. 1 SEM micro-photographs of As-hardened and heat-treated specimens of 17%Cr cast iron with 2%Mo.

Fig. 2 に残留 γ の分解率 ($f(\%) = (\text{初期の } V_\gamma - \text{焼戻し後の } V_\gamma) / \text{初期の } V_\gamma$) と焼戻し時間との関係の一例を示す。残留 γ の分解は、焼戻し温度が高いほど短時間で起り、S 字状に進行する。この傾向は、供試材の種類が異なっても、同様であった。このことから、温度及び保持時間を適当に選ぶことにより、目的の V_γ を得ることが可能である。

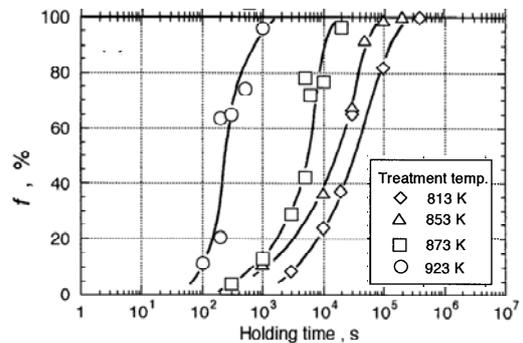


Fig. 2 Relationship between decomposition ratio (f) of retained austenite and tempering condition of 17%Cr cast iron with 2%Mo

(2) 小型電磁気センサの概要

ここでは電磁現象を利用して短時間かつ簡便に鋳鉄内の V_γ を測定する手法を検討した。鋳鉄内に γ が含有されると鋳鉄内のマクロ的な透磁率や導電率が変化する。この電磁気特性の差を検出することで、鋳鉄内の V_γ が非破壊的に測定できると考えられる。本研究では、この電磁気特性の差を検出する電磁

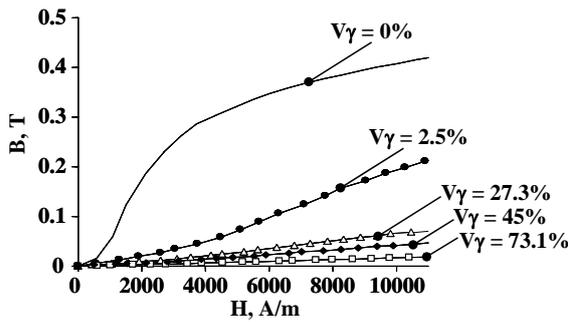


Fig. 6 B-H curves of high chromium cast iron with different V_γ .

② 導電率の評価

ここでは、ケルビン・ダブルブリッジ低抵抗測定回路を用いて、各試験片の導電率 σ S/m を求めた。Fig. 7 に測定結果を示す。図から、試験片内の導電率は、試料内の V_γ の増加と共に減少することが分かる。これはオーステナイト領域の電気抵抗が大きいことから、 V_γ の増加に伴い試料のマクロ的な抵抗値が増加するためと考えられる。

③ 残留オーステナイト量の測定

高クロム鋼鉄は V_γ の増加に伴い、透磁率及び導電率は減少する。そのため V_γ の変化による電磁気特性の差を検出することで試料内の V_γ の値が測定可能であると考えられる。ここでは Cr 量が 17% の高クロム鋼鉄に対し、各 V_γ に伴う電磁気センサの検出コイルから得られる磁束密度 B の強度について検討を行った。電磁気センサに流す励磁条件は 500Hz, 0.5A 一定とし、電磁気センサと試験鋼鉄との隙間 (リフトオフ L_o) は密着させた場合 ($L_o=0\text{mm}$) での実験を行った。実験結果を Fig. 8 に示す。なお、図には L_o を 0~1.5mm まで変化させた場合の結果も合わせて示している。また図の縦軸は、 $V_\gamma=0\%$ の高クロム鋼鉄を測定した際の、検出コイル内部に鎖交する磁束密度 B を基準とし、次式を用いて

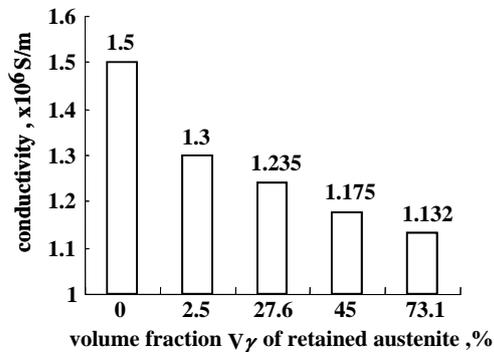


Fig. 7 Conductivity of high chromium cast iron with different V_γ .

表した減衰率 B_η を示している。

$$B_\eta (\%) = \frac{B(\text{each } V_\gamma) - B(V_\gamma = 0\%)}{B(V_\gamma = 0\%)} \times 100 \quad (1)$$

Fig. 8 から $L_o=0\text{mm}$ の場合、 V_γ が増加するに伴って、 B_η が低下する事が分かる。これは、 γ は非磁性であるため、 V_γ が増加すると高クロム鋼鉄内のマクロ的な透磁率と導電率が共に低下し、鋼鉄内の渦電流の発生量も低下する事から磁束密度が減衰するためだと考察できる。次に、 L_o が増加すると、 V_γ の増加に伴う B_η の低下度合いが小さくなる事が分かる。これは、電磁気センサ内の励磁コイルから発生する印加磁束が空气中に漏れ出し、試験鋼鉄内に侵入する磁束量が減少するためだと考えられる。この事から、なるべく L_o は小さく設定する事が必要である、しかし、 L_o を一定に設定する事で、 B_η の値を使用して非破壊的に鋼鉄内の V_γ の測定が行える可能性がある。

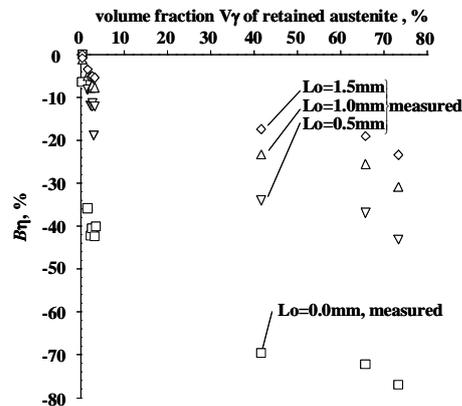


Fig. 8 Effect of V_γ on change of flux density (B_η) in high chromium cast iron with 17%Cr.

(4) 26%Cr 鋼鉄の残留オーステナイト量の測定

ここでは Cr が 26% で Mo が 2% の高クロム鋼鉄を検査対象とし、 V_γ が異なる鋼鉄を電磁気センサで測定した際、検出コイルに得られる B_η の低下度合いについて検討を行った。電磁気センサに流す励磁条件は 500Hz, 0.5A 一定とし、電磁気センサと試験鋼鉄との隙間 L_o は 0mm 一定で実験を行った。実験結果を Fig. 9 に示す。なお、図には Cr が 17% の場合と、Cr は 26% であるが、Ni が 2% の場合の結果も合わせて示している。図から、Cr, Mo, Ni の各値を変化させても明確な違いは得られず、 V_γ が増加するに伴って、 B_η が同じ割合で低下する事が分かった。これらの結果から、本手法は、Cr や Mo, Ni の含有量に影響を受けずに、 B_η の値を使用して V_γ の測定が行える可能性がある。

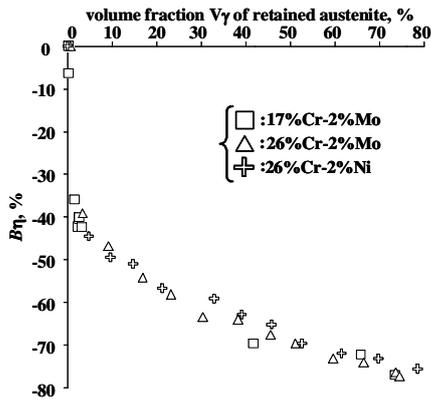


Fig. 9 Comparison of relation between B_{η} and V_{γ} in high chromium cast iron with different chemical composition. ($L_o=0\text{mm}$).

(5) 多合金白鑄鉄の残留オーステナイト量の測定

ここではCが2.13%と2.41%の多合金白鑄鉄を検査対象とし、 V_{γ} が異なる鑄鉄を電磁気センサで測定した際、検出コイルに得られる B_{η} の低下度合いについて検討を行った。なおここでの減衰率 B_{η} は、完全な $V_{\gamma}=0\%$ の多合金白鑄鉄の作製が困難であったため、作製した試験片の中で最も残留オーステナイト含有量が少なかった多合金白鑄鉄を基準とした。C量が2.13%の試料では $V_{\gamma}=1.63\%$ 、C量が2.41%の試料では $V_{\gamma}=1.32\%$ をそれぞれ基準としている。また電磁気センサに流す励磁条件は500Hz、0.5A一定とし、電磁気センサと試験鑄鉄との隙間 L_o は0mm一定で実験を行った。C量が2.13%の場合の実験結果をFig. 10に、C量が2.41%の場合の実験結果をFig. 11にそれぞれ示す。Fig. 10から、多少のバラツキはあるものの、 V_{γ} が増加するに伴って B_{η} は低下傾向を示す事が分かった。Cが2.41%のFig. 11の結果も、Fig. 10と同様の傾向を示す事が分かった。また、Fig. 10とFig. 11を合わせて示した図をFig. 12にまとめて示す。図中の白塗りの結果(□)が、C量が2.13%の試料の結果を示し、黒塗りの

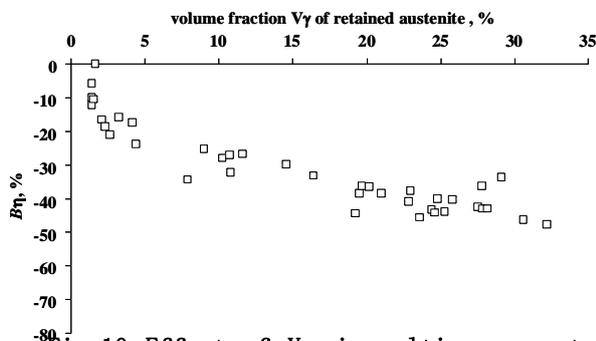


Fig. 10 Effect of V_{γ} in multi-component white cast iron with 2.13%C on change of flux density(B_{η}). ($L_o=0\text{mm}$).

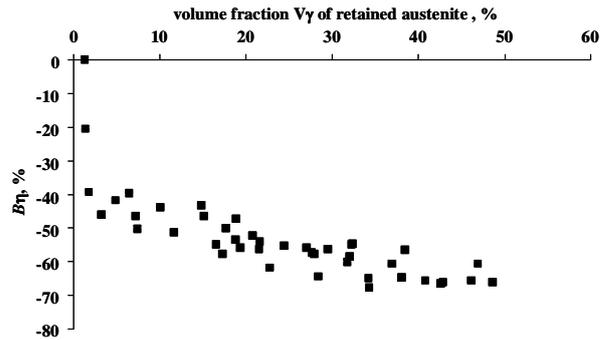


Fig. 11 Effect of V_{γ} in multi-component white cast iron with 2.41% C on change of flux density(B_{η}). ($L_o=0\text{mm}$)

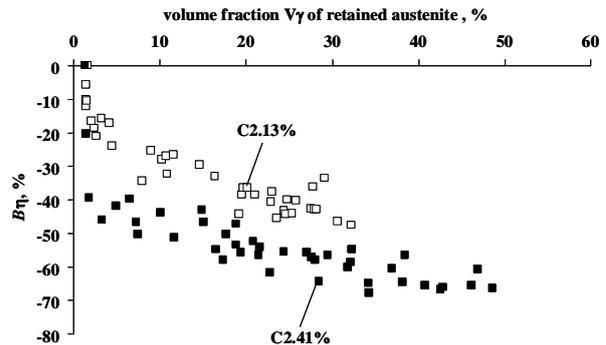


Fig. 12 Comparison of relation between B_{η} and V_{γ} in multi-component white cast iron with different carbon content ($L_o=0\text{mm}$).

結果(■)がC量2.41%の試料の結果をそれぞれ示している。図から、 $C=2.13\%$ の結果の方が $C=2.41\%$ の場合よりも全体的な減衰率 B_{η} の値が大きく評価され、 V_{γ} が増加するに伴う B_{η} は小さい事がわかる。一般的な炭素鋼の磁気特性は、C含有量が低下するに伴って透磁率が大きく増加する事が知られている。その微量な変化でも大きく表れる。そのため本ケースの様に、C含有量が2.41%から2.13%まで0.28%減少しただけで、多合金白鑄鉄内のマクロ的な透磁率は著しく増加することが考えられる。それゆえ、C量が2.13%の多合金白鑄鉄では、 V_{γ} の増加に伴う非磁性領域の増加の影響が、C量が2.41%のものより小さく評価されたと考察できる。

(6) 球状黒鉛鑄鉄の残留オーステナイト量の測定

ここでは焼入れ温度が異なる球状黒鉛鑄鉄を検査対象とし、 V_{γ} が異なる鑄鉄を電磁気センサで測定した際、検出コイルに得られる B_{η} の低下度合いについて検討を行った。なおここでの減衰率 B_{η} は、 $V_{\gamma}=0\%$ の球状黒鉛鑄鉄を基準としている。電磁気センサに流す励

磁条件は500Hz, 0.5A一定とし、電磁気センサと試験鋳鉄との隙間 L_0 は0mm一定で実験を行った。焼入れ温度変化は、900°C~1030°Cの範囲で行い、各焼入れ温度における V_γ 変化に伴う検出コイルに得られる B_n の実験結果を Fig. 13 にそれぞれ示す。図から、バラツキ度合いが大きいものの、どの焼入れ温度においても V_γ が増加するに伴って検出コイル内の B_n は低下傾向を示す事が分かった。この結果から、本手法においては、球状黒鉛鋳鉄の焼入れ温度による影響は、あまり見られないことが理解できた。この事から、球状黒鉛鋳鉄の場合、焼入れ温度に関係無く、 B_n の値から V_γ の測定が行える事が分かった。

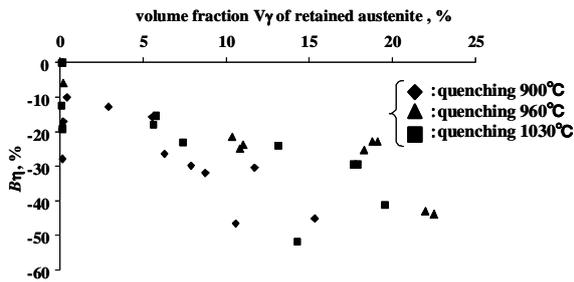


Fig. 13 Effect of quenching temperature on flux density and V_γ of ductile cast iron.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- (1) Y. Gotoh, N. Sasaguri, and N. Takahashi, "Evaluation of Electromagnetic Inspection of Hardened Depth of Spheroidal Graphite Cast Iron using 3-D Nonlinear FEM", IEEE Transaction on Magnetics, vol. 46, no. 8, (2010) pp. 3137-3144,
- (2) Y. Gotoh, A. Nishishita, N. Sasaguri and N. Takahashi, "Examination of Electromagnetic Inspection of Retained Austenite in the High Chromium Cast Iron- 3-D Nonlinear FEM Analysis Considering Non-Uniform Permeability -", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46 no. 8 (2010) pp. 3297-3300,
- (3) M. Miyamoto, K. Yamada, Y. Gotoh, T. Hiroshima, N. Sasaguri and N. Takahashi, "Non-destructive

electromagnetic inspection of surface hardened depth in surface spheroidal graphite cast iron", Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, APCNDT 2009, PS3-2, (2009) p. 103,

(4) A. Nishishita, Y. Gotoh, N. Sasaguri and N. Takahashi, "Electromagnetic inspection method of retained austenite in high chromium cast iron", Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, APCNDT 2009, PS5-5, p. 137, 2009

(5) Y. Gotoh, A. Nishishita, N. Sasaguri and N. Takahashi, "Evaluation of electromagnetic inspection of retained austenite in high chromium cast iron using 3-D nonlinear FEM considering non-uniform permeability", Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG), PC5-12, (2009) pp. 747-748

[雑誌論文] (計 5 件)

[学会発表] (計 8 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹栗 信也 (SASAGURI NOBUYA)

久留米工業高等専門学校 材料工学科・教授

研究者番号 : 50215737

(2) 研究分担者

後藤 雄治 (GOTO YUUJI)

大分大学 工学部 機械・エネルギーシステム工学科 准教授

研究者番号 : 00373184

(3) 研究分担者

山本 郁 (YAMAMOTO KAORU)

久留米工業高等専門学校 材料工学科・准教授

研究者番号 : 00325515