

高耐食電磁ステンレス鋼の諸特性に及ぼすAl, Siの影響

梶田 哲智 *1・柳谷 彰彦 *2・高田 揚大 *1・田中 義和 *1

Effects of Al and Si Contents on Properties in Magnetic Stainless Steels with High Corrosion Resistance

Tetsutomo Masuda, Akihiko Yanagitani, Akihiro Takata and Yoshikazu Tanaka

Synopsis: Magnetic stainless steels have been used for magnetic core materials. Today's industries have demanded better corrosion resistance materials without the deterioration of magnetic properties.

Effects of Al and Si contents in 18 mass% Cr grade magnetic stainless steels on electro magnetic properties, corrosion resistance and drillability were investigated. Consequently, new grade of magnetic stainless steel for magnetic core materials was developed. This has better corrosion resistance and good drillability without Pb and S. In this study, it was found that addition of more than 1 mass% Al improved crevice corrosion and addition of under 2 mass% Al improved drillability of this magnetic stainless steel.

Key words: magnetic stainless steel; corrosion resistance; resistivity; magnetic property; crevice corrosion; pitting potential; drillability.

1. 緒言

一般に電磁弁などの鉄芯材料に要求される特性は、1) 高磁束密度・高透磁率、2) 高固有抵抗、3) 高硬度、4) 良好な加工性などである。著者らはCrおよびPbなどを添加し、耐食性を付与するとともに快削性をも兼ね備えた電磁ステンレス鋼を開発してきた^{1, 2)}。しかし最近、より厳しい腐食環境での使用に耐え得るために、特に電磁気特性を損なわずに、より耐食性を向上させた材料の要求が高まってきている。

本報告では、18Cr系電磁ステンレス鋼の成分を検討して得られた、より耐食性に優れた電磁弁鉄芯材料³⁾の特性と、鉄芯材料に要求される諸特性に及ぼすAl, Siの影響について報告する。

2. 実験方法

2・1 供試材および試験片の作製

供試材の化学成分をTable 1に示す。この化学成分範囲で合金元素を複合添加した鋼を100kg真空誘導溶解炉により溶製して供試材とした。

鋼塊を1273Kで直径40mmに鍛造したあと熱処理を行い、各試験片を加工した。鍛造後の熱処理は、1273Kに15分保持後水冷する熱処理を行った。

2・2 電磁気特性

固有抵抗は、直径30mm長さ400mmの試験片を用い、一般的な直流四端子法で測定した。直流磁気特性は、外径30mm内径25mm厚さ4mmの環状試験片に加工し、磁気焼鈍を施した後巻き線を施し、直流B-Hトレーサで測定した。磁気焼鈍条件は、Ar雰囲気中で1273Kで10分間保持後放冷である。

2・3 耐食性

耐食性を隙間腐食と孔食電位により評価した。

隙間腐食試験は、20mm×30mm×3.5mmの板状試験片と円柱状のテフロンブロックにより人工的に隙間を作り、6%塩化第2鉄に24h浸漬するASTMに準拠した方法で行った。試験条件は298K、308Kおよび323Kの3水準である。

孔食電位をJISに準拠した方法により3.5%NaClを用いて308Kで測定した。

2・4 硬さと被削性

ロックウェル硬度計を用いて常温での硬さ(HRB)を測定した。

被削性をドリル穿孔性試験により評価した。使用したドリルは直径8mmのJIS標準ドリルSKH51で、ドリルの刃先に一定の荷重686Nを負荷し、回転数915rpmで10mm穿孔するのに要する平均時間で被削性を評価した。

*1 技術研究所新材料・粉末研究室

*2 技術研究所新材料・粉末研究室, 工博(現:粉末事業部営業室)

Table 1. Chemical compositions.

(mass%)					
C	Si	Cr	Mo	Al	N
<0.01	0~2	16~20	1~3	0~4	<0.01

3. 実験結果および考察

3・1 電磁気特性

3・1・1 固有抵抗

18Cr-2Mo鋼の固有抵抗に及ぼすAl量およびSi量の影響をFig.1に示す。Al量およびSi量の増加に伴い、固有抵抗は単調に増加する。Al量1%増加に伴い、固有抵抗は約 $0.20\mu\Omega\cdot m$ 増加している。また、Si量1%増加に伴い、固有抵抗は $0.17\mu\Omega\cdot m$ 増加している。18Cr-2Mo鋼をベースにとるとSiよりもAlの添加が固有抵抗増大により大きく寄与することが分かる。

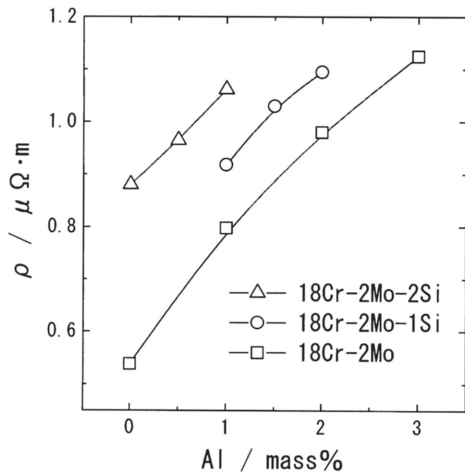


Fig.1. Effects of Al and Si contents on the resistivity of Fe-18Cr-2Mo steel.

3・1・2 直流磁気特性

直流磁気特性に及ぼすAl量の影響をFig.2に示す。ベース鋼は18Cr-2Mo鋼である。B₂, B₃およびB₁₀は、それぞれ磁界の強さ159.2A/m (20e), 238.8A/m (30e) および796A/m (100e) における磁束密度を示している。保磁力 (Coercive force : Hc) は、印加磁場796A/m (100e) におけるB-Hループでの値である。

Al量の増加に伴い、B₁₀のように高い磁場を印加した時の磁束密度は直線的に減少する。これは、合金元素の総量が増えることにより磁気モーメントが減少するためである⁴⁾。B₂, B₃など軟磁性材料として重要な低い磁場での磁束密度は、Al量1~3%の範囲で変化は見られない。また保磁力も、Al量の増加に伴う変化は認められず同程度で維持している。

Al添加による固有抵抗の増大も考えあわせると、Al添加は鉄芯材料に有効であると考えられる。

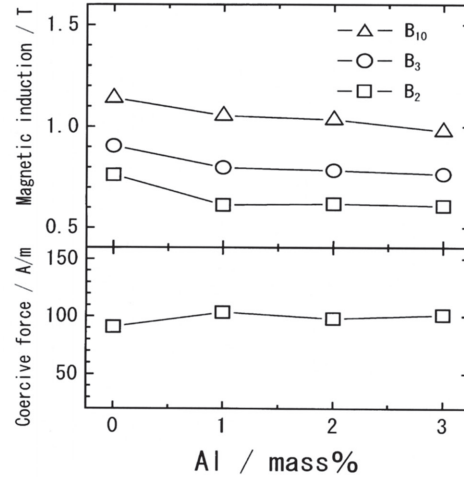


Fig.2. Effect of Al content on magnetic properties of 18Cr-2Mo steel.

3・2 耐食性

3・2・1 隙間腐食

隙間腐食減量に及ぼすAl量の影響をFig.3に示す。Al量が1%以上になると腐食減量は減少する。また、323KではAl量の増加に伴い単調に減少する。隙間腐食試験片の外観写真をFig.4に示す。Al量が増加しても外観上あまり変化が見られないが、隙間腐食部分の深さがAl量の増加に伴って浅くなっており、このことからAl量1%以上の添加は腐食の進行を抑制する効果があることが分かる。323Kでは、Al量2%および3%で隙間以外の部位に孔食が発生しているにもかかわらず、腐食減量は減少している。温度上昇に伴い、腐食の進行を抑制するAl添加の効果は増大すると考えられる。

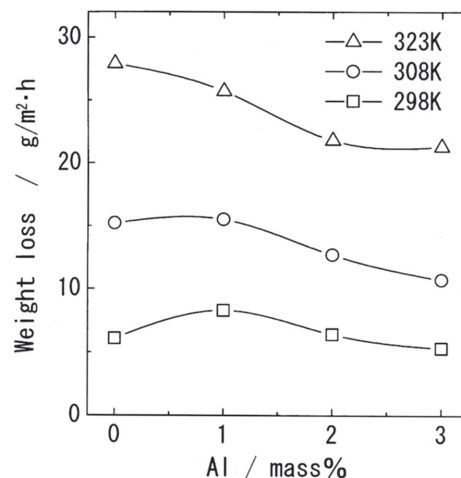


Fig.3. Effect of Al content on crevice corrosion rate of 18Cr-2Mo steel (Weight loss) .

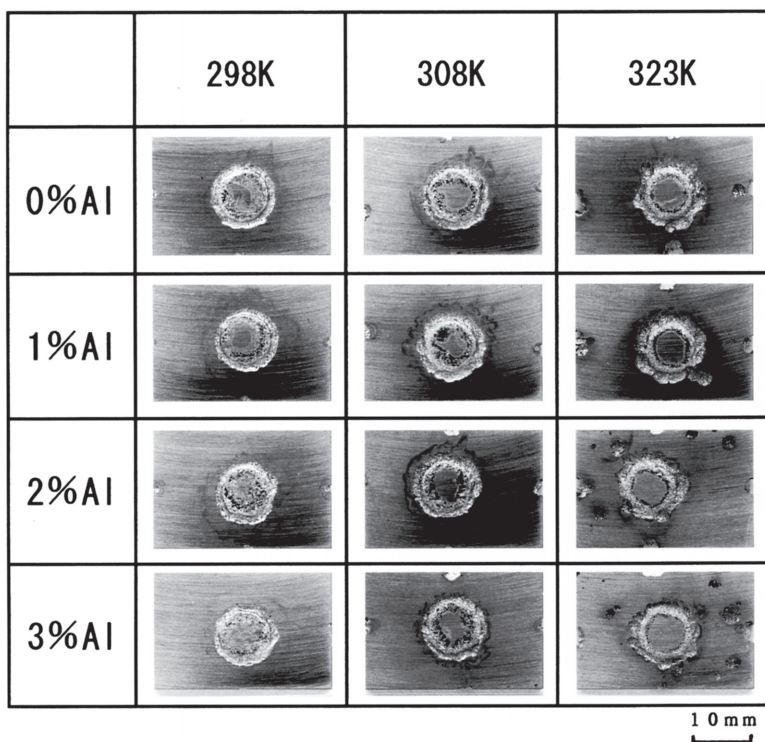


Fig.4. Effect of Al content on crevice corrosion of 18Cr-2Mo steel (Surface appearance) .

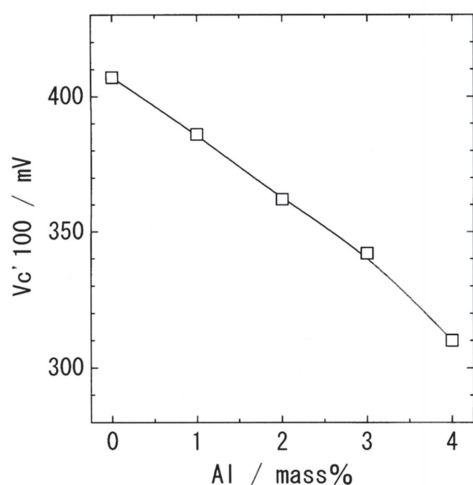


Fig.5. Effect of Al content on pitting potential of 18Cr-2Mo steel.

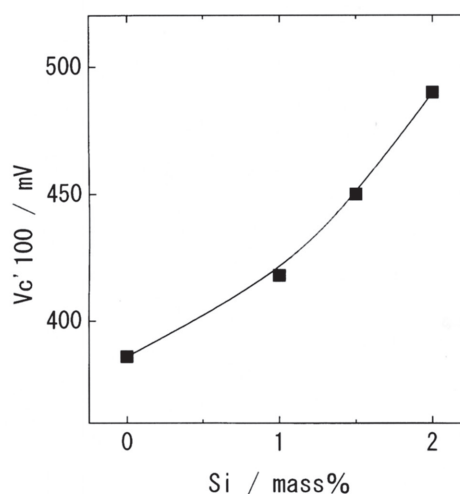


Fig.6. Effect of Si content on pitting potential of 18Cr-2Mo-1Al steel.

3・2・2 孔食電位

18Cr-2Mo鋼の孔食電位に及ぼすAl量の影響をFig.5に、18Cr-2Mo-1Al鋼の孔食電位に及ぼすSi量の影響をFig.6に示す。Al量の増加に伴い、孔食電位は単調に減少する。Al量1%の増加に伴う孔食電位の減少は約20mVであった。また、Si量の増加に伴い、孔食電位は単調に増加する傾向が見られた。Si量1%の増加に伴い、孔食電位は約50mV増加する。

3・3 硬さと被削性

18Cr-2Mo鋼の硬さに及ぼすAl量およびSi量の影響をFig.7に示す。Al量およびSi量の増加に伴い、硬さは直線的に増加する。Al量1%の増加に伴い、硬さはロックウェルBスケールで約2.5ポイント増加している。また、Si量1%の増加

に伴い約4.5増加している。硬さに対してSiはAlの約2倍寄与することが分かる。

18Cr-2Mo鋼のドリル穿孔性に及ぼすAl量の影響をFig.8に示す。Fig.7で示したように硬さはAl量の増加に伴い直線的に増加するが、ドリル穿孔時間はAl量0~2%の範囲では短縮されている。18Cr-2Mo鋼と18Cr-2Mo-2Al鋼を比較すると、Al量2%の添加により約20%減少している。このAlを2%添加した12.7sという値は、従来のPbやS²⁾を添加した電磁ステンレス鋼と比較して5~20%の増加であり、Pbなどの快削元素を含まない材料としては良好なドリル穿孔性であると考えられる。これに対し、Siを2%添加すると、ドリル穿孔時間は21.2sとかなり増加している。

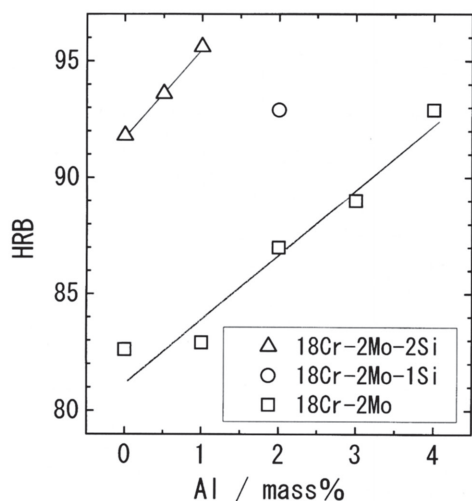


Fig.7. Effects of Al and Si contents on hardness of 18Cr-2Mo steel.

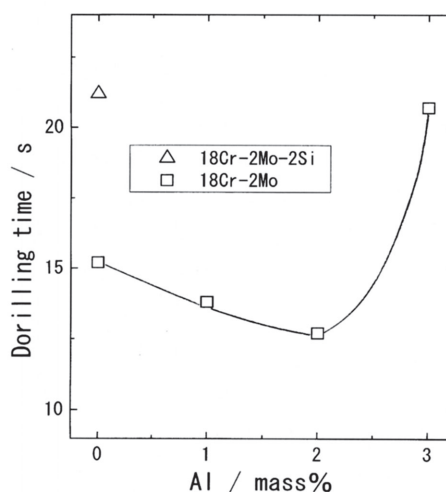


Fig.8. Effects of Al and Si contents on drillability of 18Cr-2Mo steel.

3・4 まとめ

本研究で得られた結果をもとに合金元素の添加バランスを検討して得られた開発鋼の主成分と諸特性の一例をTable 2およびTable 3に示す。開発鋼の固有抵抗は、すべて従来のいわゆる電磁ステンレス鋼と比較し十分に高い値を示しており、交流用途に適した材料といえる。孔食電位のレベルとしては、SUS316の560mVには及ばないものの、SUS304が320mVのレベルであるのと比較して十分に高い耐食性を持つ材料といえる。硬さは、90HRBレベルで電磁弁等の鉄芯材料には十分な硬さである。ドリル穿孔時間はCr, MoおよびSiの添加量が増えると長くなる傾向にあるが、No.1~3は、20s以下に抑えられており、特に開発鋼No.1は良好なドリル穿孔性を示している。保磁力 (Hc) は添加元

素量の増加に伴い増加する傾向を示しているが、磁束密度 B_{10} はすべて1Tのレベルであり、実用上十分な磁性をもっていると考えられる。

交流用途の鉄芯材料や電磁弁の応答性には、高固有抵抗が不可欠な特性である⁵⁾。固有抵抗を増加させるためには、Si, Alの添加が有効であるが、Siの添加は硬さを増加させ、冷間加工の入る用途には適さない。また、被削性の点で好ましくない。そこで、ここではSiよりも固有抵抗増加の効果が大きいAlを2%添加することにより固有抵抗を $1\mu\Omega\cdot m$ レベルに維持し、他の要求される特性によりMo, Siを添加する方針で合金設計している。今後このようなAl, Siなどの合金元素の複合添加材が次世代の電磁ステンレス鋼として有効であると考えられる。

Table 2. Chemical compositions.

No.	(mass%)					
	C	Si	Cr	Mo	Al	N
1	0.005	0.15	17.87	1.92	1.960	0.0044
2	0.004	0.15	19.84	1.94	1.920	0.0037
3	0.005	0.18	17.76	3.03	1.970	0.0046
4	0.006	1.01	17.88	1.92	1.990	0.0045

Table 3. Properties of magnetic stainless steels.

No.	Resistivity $\mu\Omega\cdot m$	Pitting Potential mV	HRB	Drilling time s	B_{10} T	Hc A/m
1	0.97	362	87	12.7	1.05	87.5
2	0.98	427	89	14.4	1.01	103.5
3	1.00	448	90	16.8	1.01	119.4
4	1.07	408	93	23.1	1.00	135.3

4. 結言

18Cr系電磁ステンレス鋼の電磁気特性、耐食性および被削性等に及ぼすSi, Alなどの合金元素添加の影響を調査した。その調査をもとに合金元素の添加量を検討した結果、従来の電磁ステンレス鋼と比較してより耐食性に優れ、なおかつPb, Sなどの一般的な快削元素を添加しない電磁弁鉄芯材料が得られた。

本研究で得られた結論は次の通りである。

- (1) Alを1%以上添加すると、隙間腐食の進行は抑制される。また、この効果は温度上昇に伴い、より明確になる。
- (2) Alを2%以下の範囲で添加すると、ドリル穿孔性は本研究の条件では改善する傾向にある。ドリル穿孔性が最も良いものでは、従来の電磁ステンレス鋼（Pb添加材）とほぼ同レベルの値を示した。
- (3) 本研究で検討したTable 2に示す成分の開発鋼は、い

れも優れた電磁気特性をもっており、交流用途の鉄芯などに適している。特に耐食性の必要な電磁弁の鉄芯材料などに適していると考えられる。要求される特性によりAlおよびSiなど、合金元素のバランスを考慮した複合添加材が、次世代の電磁ステンレス鋼として有効であると考えられる。

文 献

- 1) 柳谷彰彦, 田中義和: 鉄と鋼, 69 (1983), 232.
- 2) 中里弘昭, 田中義和: 材料とプロセス, 1 (1988), 1910.
- 3) 樹田哲智, 柳谷彰彦, 中里弘昭, 田中義和: 材料とプロセス, 3 (1990), 1908.
- 4) R.M.Bozorth: Ferromagnetism, (1951), 215.[D.Van Nostrand Co.,Inc.]
- 5) 例えば, 斎藤章彦, 竹内桂三ほか: 日本金属学会会報, 29 (1990), 478.

