

# 精密鑄造した電磁ステンレス鋼の諸特性

高田揚大<sup>\*</sup>, 柳谷彰彦<sup>\*2</sup>, 田中義和<sup>\*</sup>, 藤井良信<sup>\*\*</sup>, 戸田拓夫<sup>\*\*2</sup>

Characteristics of electro-magnetic stainless steels produced by investment casting  
Akihiro Takata, Akihiko Yanagitani, Yoshikazu Tanaka, Yoshinobu Fujii and Takuo Toda

Synopsis: The authors have developed QMR steels which have excellent performance of soft magnetism, high resistivity, corrosion resistance and good machinability. QMR steels have been produced by conventional casting followed by rolling. These steels are now applied to various kinds of sensors and actuators such as EFI (Electric Fuel Injector) and solenoid valve. Recently, more economical processes for QMR steels are desired, since the shape of these devices becomes more complicated. It is known that investment casting is suitable for direct processing of complex shape parts. In this paper, we experimentally produced QMR steels by investment casting and discussed the characteristics of these QMR steels.

Key words: investment casting; soft magnetic properties; tensile strength; stainless steel.

## 1. 緒言

近年、電子機器の発達によって各種制御機器はエレクトロニクスとの連動を図る、いわゆるメカトロニクス化の方向に開発が進められてきており、その多様化する用途に適した新しい材料の開発が強く求められてきている。なかでも軟質磁性材料に対する期待は大きく、個々の用途に適した特性を備えた材料の開発が進められている。

このような動向のなかで軟質磁性材料においては優れた磁気特性、電気特性および耐食性など諸特性を兼ね備えた新しい材料が要求され、著者<sup>\*、\*2</sup>らはこれまでに種々の新しい電磁ステンレス鋼を開発し製品化してきた<sup>1)~5)</sup>。これらの電磁ステンレス鋼はその特性を活かし、電磁弁鉄心、電子制御式燃料噴射弁、各種センサー等に应用されている。

ところで材料の製造プロセスにおいて、種々の製品のコストダウンの要請が高まり、複雑形状の部品をニアネットシェイプで製造できるという点で精密鑄造、冷間鍛造、粉末成形等の精密加工法が注目されるようになってきた。近年では構造物材料だけでなく機能材料においてもこの精密加工法が適用されており、その中でも磁性材料においてはパーマロイ系やSi鋼などでインベストメント精密鑄造法の応用が行われてきた。しかしながら優れた電磁気特性・耐

食性を兼ね備えたいわゆる電磁ステンレス鋼についての実施例は少ないといえる。このようなことから、インベストメント精密鑄造メーカーであるキングインベスト株式会社と共同研究を行い、この材料の精密鑄造を試みてきた。本報では主として制御機器用材料として既に開発してきた電磁ステンレス鋼の概要を述べるとともに、インベストメント法で作製した電磁ステンレス鋼の基礎特性を述べ、さらに二三の精密鑄造部品の紹介を行う。

## 2. 電磁ステンレス鋼QMRシリーズの諸特性

先に述べたように各種制御機器の分野においては、メカトロニクス化の方向に新しい材料の開発が要求されており、このような動向のなかで、著者<sup>\*、\*2</sup>らは電磁ステンレス鋼QMRシリーズを開発してきた。そのなかで代表的な二三の材料についてその概要を紹介する。

電磁ステンレス鋼はその名の通り電磁気特性に優れ、耐食性を備えた軟質磁性材料で、ソレノイドなど軟磁性鉄心材料として開発されたものである<sup>1)~5)</sup>。この材料には

- (a) 優れた耐食性
- (b) 大きな電磁吸引力
- (c) 低い消費電力

\* 技術研究所新材料研究室

\*2 技術研究所新材料研究室, 工博

\*\* キングインベスト株式会社技術部金属材料研究室 (〒720 福山市御幸町中津原1812)

\*\*2 キングインベスト株式会社

(d) 良好な被削性・冷鍛性

などの特性が要求され、QMRシリーズはこれらのニーズに適合する材料として開発されてきた。

2・1 特徴

従来、電磁弁の固定鉄心やプランジャーには、電磁軟鉄・Fe-Si鋼あるいはFe-Si-Al鋼が使用されてきたが、これらはいずれも難削性であり、耐食性が劣るといった問題点があった。開発したQMR1L、QMR3LおよびQMR5LはいずれもFe-Cr-Si-Al-Pbを主成分にしたもので、Fig.1に示すように優れた電磁気特性の上にCr添加により耐食性を、またPb添加により被削性を向上させたものである。また用途に応じて、冷間鍛造性または耐摩耗性を重視したものを開発してきた。

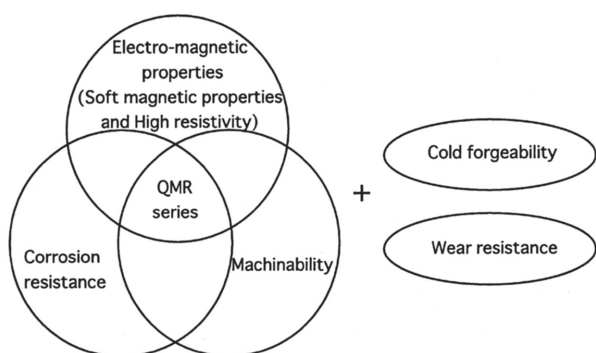


Fig.1. Characteristics of QMR series.

2・2 品質特性

Table 1にQMRシリーズの主成分を示す。用途に応じた電磁気特性および耐食性を持たせるため、3種類の化学成分を設定した。以下にその諸特性について簡単に説明する。

Table 1. Chemical composition of QMR series.

| Steel | (mass%) |    |     |     |       |         |
|-------|---------|----|-----|-----|-------|---------|
|       | Si      | Cr | Mo  | Al  | Pb    | Fe      |
| QMR1L | 2       | 7  | -   | 0.6 | added | balance |
| QMR3L | 0.3     | 13 | 0.2 | 1.0 | added | balance |
| QMR5L | 1.5     | 15 | 0.3 | 1.0 | added | balance |

2・2・1 電磁気特性

軟磁性材料においてはC,Nなど結晶格子間に侵入型不純物として存在する元素は、結晶格子を歪ませ、磁壁の移動を妨げ、軟磁気特性を低下させる作用を持つため、その含有量を極力低減する必要がある。QMRシリーズにおいてはこれらの不純物元素を極低レベルに抑えており、Table 2に示すように優れた軟磁気特性を実現している。またSiおよびAlの適正量添加により高い固有抵抗を有しているため、交流用途において消費電力の低減が図れる。

Table 2. Electro-magnetic properties of QMR series.

| Steel | Flux density          |                       |                        | Coercive force<br>Hc<br>(A/m) | Resistivity<br>$\rho$<br>( $\mu\Omega \cdot m$ ) |
|-------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|--|
|       | B <sub>2</sub><br>(T) | B <sub>5</sub><br>(T) | B <sub>25</sub><br>(T) |                               |  |
| QMR1L | 0.68                  | 1.21                  | 1.41                   | 111.4                         | 0.85   |
| QMR3L | 0.80                  | 1.05                  | 1.26                   | 75.6                          | 0.80   |
| QMR5L | 0.64                  | 0.98                  | 1.21                   | 95.5                          | 0.99   |

B<sub>2</sub> : Flux density at 159A/m ( 2 Oe)

B<sub>5</sub> : Flux density at 398A/m ( 5 Oe)

B<sub>25</sub> : Flux density at 1990A/m (25 Oe)

2・2・2 耐食性

QMRシリーズの耐食性をTable 3に示す。QMR1Lは湿潤環境での耐錆性に優れており、従来電磁軟鉄、珪素鋼などが使用されている分野で、発錆を嫌う用途に適している。またCr,Al,Moの適量添加により、QMR3Lは13Cr系ステンレス鋼と同等以上、QMR5Lは17Cr系ステンレス鋼並の耐食性を備えている。

Table 3. Corrosion resistance of QMR series (immersion test).

| Steel       | Corrosion rate : g/m <sup>2</sup> h |           |                   |                                   |                     |
|-------------|-------------------------------------|-----------|-------------------|-----------------------------------|---------------------|
|             | 5% NaCl                             |           | 5% HCl            | 5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 5% HNO <sub>3</sub> |
|             | 25°C, 24h                           | 60°C, 24h | 25°C, 24h, 2times |                                   |                     |
| QMR1L       | 0.08                                | -         | 2.8               | 25                                | 37                  |
| QMR3L       | 0.02                                | 0.05      | 2.0               | 5.3                               | 0.16                |
| QMR5L       | <0.02                               | <0.02     | 2.0               | 3.7                               | <0.02               |
| Fe-13Cr-2Si | 0.02                                | 0.21      | 15.5              | 28.1                              | 0.34                |
| SUS403      | 0.02                                | 0.18      | 9.3               | 103                               | 12                  |

2・2・3 被削性

直径5mmのドリルを用い、深さ10mmを穿孔するのに必要な時間を測定することにより被削性の評価を行った。切削するのに必要な時間が短いほど被削性が良いといえる。被削性比較試験結果をFig.2に示す。QMRシリーズは快削元素であるPbを添加することにより、被削性を改善させており、従来材の13Cr系電磁ステンレス鋼やSUS410に比べ、穿孔所要時間が短く、切削能率をあげることができる。

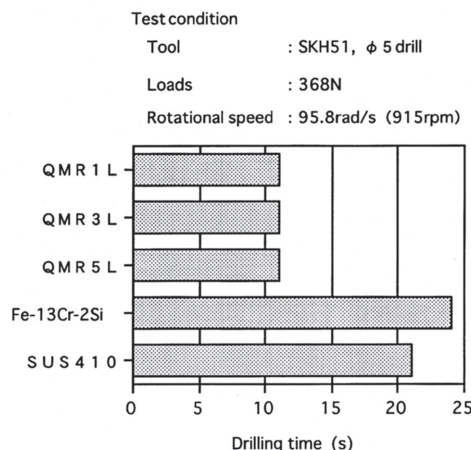


Fig.2. Machinability of QMR series.

### 2・2・4 硬さ

QMRシリーズの硬さをTable 4に示す。QMR1LおよびQMR5Lはそれぞれ85HRB, 88HRBの硬さを持っており、耐摩耗性に優れている。またQMR3Lは冷間鍛造用途向けに開発されたもので硬さレベルを抑え、冷間加工性に優れた鋼種である。

Table 4. Hardness of QMR series.

| Steel | Hardness, HRB |
|-------|---------------|
| QMR1L | 85            |
| QMR3L | 73            |
| QMR5L | 88            |

## 3. 精密鑄造した電磁ステンレス鋼 (QMR3L) の諸特性

上述の電磁ステンレス鋼の中でQMR3Lの精密鑄造品の諸特性について述べる。

### 3・1 実験方法

Fig.3に示す部品を精密鑄造し、Fig.4に示した部位から試料を切り出し各種特性を測定した。結果を以下に示す。



Fig.3. Appearance of investment casting sample.

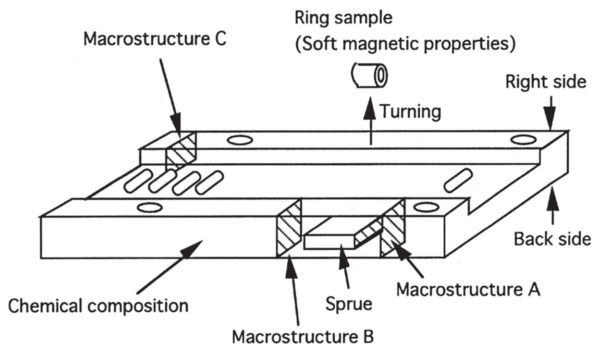


Fig.4. Sampling position.

### 3・2 化学成分

鑄造前後の化学成分変化をTable 5に示す。鑄造前後で比較すると、C,Si,Cr,Nが鑄造後に増加している。C,Siについては溶解中に脱酸材として使用しているC粉および金属Siから、Nについては大気から混入したものである。Crについては歩留りを考慮して添加したものである。またAlについては鑄造後に減少しているが、溶解中に酸素と結合しスラグとなったものである。

Table 5. Chemical composition change of before and after casting.

|                 | (mass% , O and N:ppm) |      |      |       |       |      |       |      |      |      |    |     |
|-----------------|-----------------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|----|-----|
|                 | C                     | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr    | Mo   | Al   | Pb   | O  | N   |
| Parent material | 0.005                 | 0.34 | 0.29 | 0.023 | 0.006 | 0.15 | 13.00 | 0.21 | 1.09 | 0.13 | 7  | 68  |
| After casting   | 0.010                 | 0.62 | 0.31 | 0.021 | 0.006 | 0.13 | 13.55 | 0.19 | 0.91 | 0.10 | 14 | 209 |

### 3・3 磁気特性

先に示したFig.4のように磁気特性測定用のリング試料を切り出し、1123Kで14.4ks保持の真空焼なましを施し、磁気特性を測定した。参考として熱間鍛造で作製したものとを比較をTable 6に示す。精密鑄造品は鍛造品に比べて磁束密度Bの値が低くなっている。この原因として精密鑄造品は磁気特性を悪化させる成分であるCおよびNが増加しているためであると考えられる。一方保磁力Hcについては精密鑄造品の方が小さく良好な値を示している。これは精密鑄造品の結晶粒が非常に大きいためであると考えられる。

Table 6. Comparison of magnetic properties.

| Process | Annealing at 1123K for 14.4ks |                       |                       |                       |                        |                        |                         |                |
|---------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------|
|         | B <sub>1</sub><br>(T)         | B <sub>2</sub><br>(T) | B <sub>3</sub><br>(T) | B <sub>5</sub><br>(T) | B <sub>10</sub><br>(T) | B <sub>25</sub><br>(T) | H <sub>c</sub><br>(A/m) | μ <sub>m</sub> |
| Forging | 0.51                          | 0.89                  | 1.00                  | 1.11                  | 1.21                   | 1.33                   | 73.2                    | 5430           |
| Casting | 0.24                          | 0.48                  | 0.63                  | 0.83                  | 1.08                   | 1.28                   | 59.0                    | 2520           |

### 3・4 マクロ組織

Fig.4で示した位置のマクロ組織をFig.5に示す。A部、B部、C部と鑄込み口から離れるに従って結晶粒が小さくなっていることが分かる。

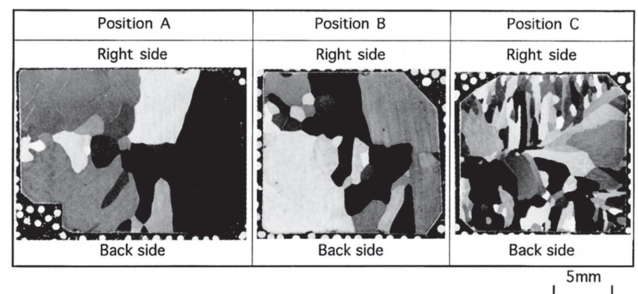


Fig.5. Macrostructure of casting.

#### 4. 精密鑄造したQMR3L (1mass%Si) の諸特性

QMR3Lの鑄造による化学成分の変化, 磁気特性及びマクロ組織については上述した。ここでは湯流れ性を向上させるためにSi添加量をを0.3%から1%に増加させたもので実験を行なった結果を示す。また機械的性質および磁気特性に及ぼす熱処理の影響, さらに実際に精密鑄造で試作した電磁部品について述べる。

##### 4.1 機械的性質

引張試験に用いた試料の化学成分をTable 7に示す。引張強さに及ぼす熱処理の影響を調べるため, 鑄造後に焼なましを施しJIS4号試験片にて引張強さを測定した結果をTable 8およびFig.6に示す。試験は鑄造ままと1123Kで14.4ks保持および1173Kで14.4ks保持焼なましの3条件で行なった。焼なましにより引張強さの向上が見られた。

Table 7. Chemical composition of tensile testing sample.

| (mass%, O and N:ppm) |      |      |       |       |      |       |      |      |       |    |     |  |
|----------------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|----|-----|--|
| C                    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr    | Mo   | Al   | Pb    | O  | N   |  |
| 0.007                | 0.98 | 0.29 | 0.022 | 0.005 | 0.12 | 12.76 | 0.19 | 1.00 | 0.100 | 17 | 158 |  |

Table 8. Tensile strength.

| Annealing condition | Tensile strength (MPa) |
|---------------------|------------------------|
| As cast             | 327.8                  |
| 1123×14.4ks         | 329.9                  |
| 1173×14.4ks         | 343.7                  |

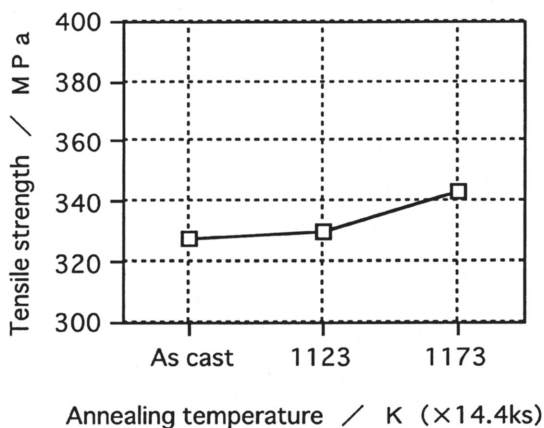


Fig.6. Relationship between annealing condition and tensile strength.

##### 4.2 磁気特性

磁気特性測定に用いた試料の化学成分をTable 9に示す。磁気特性測定用にリング状の試料を鑄造し, 鑄造まま,

1123Kおよび1173Kの真空焼なましを行なったもので磁気特性の比較を行なった結果をTable 10およびFig.7に示す。磁束密度Bおよび最大透磁率 $\mu_m$ は鑄造ままと比べ, 焼なましを施したもののほうが高くなっており, 焼なましにより磁気特性が向上することが分かる。また焼なまし温度が高いほどその効果が大きいことが分かる。

Table 9. Chemical composition of magnetic testing sample.

| (mass%, O and N:ppm) |      |      |       |       |      |       |      |      |       |   |     |  |
|----------------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|---|-----|--|
| C                    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr    | Mo   | Al   | Pb    | O | N   |  |
| 0.010                | 1.02 | 0.29 | 0.022 | 0.005 | 0.13 | 12.79 | 0.19 | 1.03 | 0.090 | 8 | 139 |  |

Table 10. Magnetic properties.

| Annealing condition | B <sub>1</sub> (T) | B <sub>2</sub> (T) | B <sub>3</sub> (T) | B <sub>5</sub> (T) | B <sub>10</sub> (T) | B <sub>25</sub> (T) | H <sub>c</sub> (A/m) | $\mu_m$ |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------|
| As cast             | 0.20               | 0.45               | 0.61               | 0.80               | 1.02                | 1.22                | 69.2                 | 2250    |
| 1123×14.4ks         | 0.27               | 0.56               | 0.73               | 0.92               | 1.12                | 1.28                | 72.4                 | 2940    |
| 1173×14.4ks         | 0.29               | 0.62               | 0.80               | 0.99               | 1.16                | 1.29                | 70.0                 | 3200    |

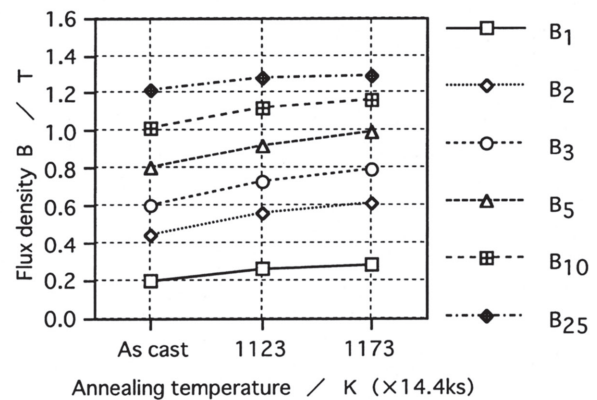


Fig.7. Relationship between annealing condition and flux density.

##### 4.3 インベストメント精密鑄造で作製した製品例

インベストメント精密鑄造で作製したQMR3L (1mass%Si) の製品例をFig.8に示す。Siを添加することにより湯流れ性が良くなり, このような複雑形状のものでも比較的良好に鑄造することができた。

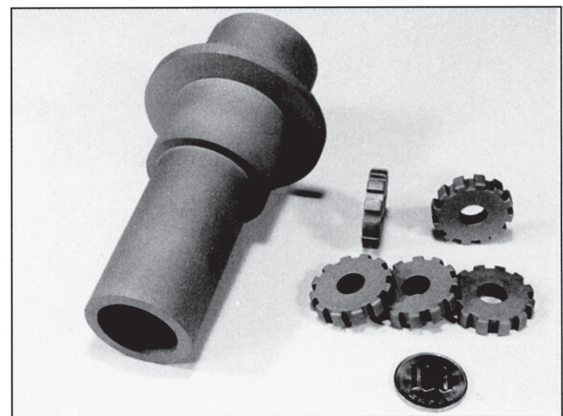


Fig.8. Examples of investment casting product.

## 5. 結び

材料に必要な特性として、材料自体の基礎特性はもちろん重要であるが、材料は目的の形状に加工ができてはじめて有用なものとなる。紹介してきたQMRシリーズも、基礎特性の上に被削性、冷間鍛造性等の加工性を付与してはじめて商品化された。今後の動向として、機能材料部品の複雑形状化に伴い製造プロセスの更なるニアネットシェイプ化の要求の高まりが考えられ、インベストメント精密鑄造の適応範囲拡大が望まれる。このようなニーズに応えるためにも、鑄造技術の向上及び鑄造に適した材料開発が必要である。

## 文 献

- 1) 柳谷彰彦, 田中義和: 鉄と鋼, 69 (1983), p.S1286
- 2) 中里弘昭, 柳谷彰彦, 田中義和: 鉄と鋼, 71 (1985), p.S1470
- 3) 田中義和: 特殊鋼, 35 (1986) 8, p.25
- 4) 中里弘昭, 田中義和: 材料とプロセス, 1 (1988), p.1910
- 5) 柳谷彰彦, 樹田哲智, 高田揚大, 中里弘昭, 田中義和: まてりあ, 34 (1995), p.632

