

電磁ステンレス鋼QMRシリーズの諸特性

高田 揚大*

1. 緒言

近年、エレクトロニクス・メカトロニクスの分野において、電磁材料など高機能を有する材料が多く使用されてきている。当社ではこのような社会のニーズに適合する素材の研究開発をすすめており、これまでに電磁弁や各種センサーなどに使用される電磁材料の商品化を行ってきた。電磁材料においては、高い固有抵抗、優れた軟磁気特性に加えて耐食性、被削性、耐摩耗性、冷間加工性の向上が求められている。山陽特殊製鋼では、長年の特殊鋼製造で培った高纯净度鋼の製造技術をベースに、高品質の極低炭素・極低窒素電磁ステンレス鋼QMRシリーズをお客様に提供し好評を得ている。ここでは電磁ステンレス鋼QMRシリーズの特徴と用途例について紹介する。

2. 開発の経緯

油圧・空圧機器の分野でも電磁弁の需要は伸びており、多様化する用途に適した新しい材料が要求されている。従来から使用されている電磁材料として、電磁軟鉄、3%珪素鋼などがあるが、これらはいずれも削りにくい、錆びやすいなどの問題点があった。電磁軟鉄、3%珪素鋼は使用される環境によっては容易に錆が発生するため、錆に対するメッキなどの表面処理が必要である。腐食性環境での使用に対しては、種々の防錆対策で対処されていたが、防錆処理工程の省略や耐食性の信頼性という点から、本質的に耐食性を備えた材料の開発が望まれてきた。また、電磁軟鉄は良好な磁気特性を有しているが、固有抵抗が低いため交流用途では消費電力が大きくなるという問題があった。3%珪素鋼においても電磁軟鉄に比べ固有抵抗の改善はされているが十分とはいえなかった。

当社のQMRシリーズはこの様なニーズに鑑み、図1に示すような概念に基づいて開発してきたもので、Si,Alの添加により電磁気特性を、Cr添加により耐食性を、快削元素であるPbの添加により被削性を向上させたものである。また、合金成分バランスを変化させることにより、耐摩耗性または冷間鍛造性を重視した素材を開発してきた。

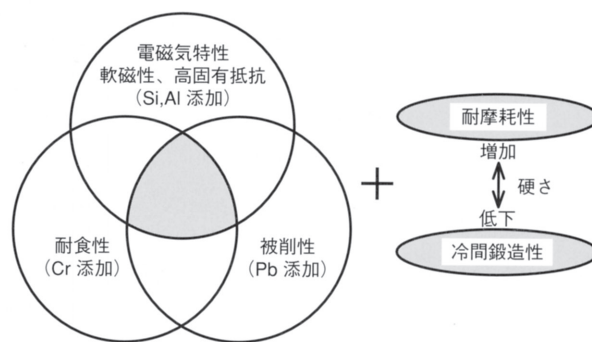


図1 QMRシリーズの概念図

3. 各種特性に及ぼす合金元素の作用

図2に各種特性に及ぼす合金元素の作用を示す。

3・1 磁気特性

磁気特性のうち初期磁化曲線の立ち上がり部分は、Al,Siを添加することにより上昇し特性が改善されるが、C,N,Sなどの不純物元素が多く含有されると低下する。保磁力についてもC,N,Sが多くなると大きくなり、一方、軟磁気特性としては劣化する。これは、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、結晶格子をひずませ、磁壁の移動を妨げるためである。また、磁束密度がほぼ飽和してくる部分では、Fe以外の磁性をもたない合金元素であるCr,Si,Alが多くなるにしたがって低下する。

3・2 固有抵抗

固有抵抗は交流で使用するには重要な特性である。鉄心材料を交流磁場で用いる場合には種々の電力損失が生じるが、その中でももうず電流損失が特に問題になる。このうず電流損失は材料の固有抵抗を増加させることにより低減できることが知られており、交流用途で使用される電磁材料は固有抵抗が高いことが望まれる。Fe-Cr-Si-Al系合金ではCr,Si,Alはともに固有抵抗を増加させる効果があるが、添加量1%あたりの固有抵抗増加率はAlが最も大きく、ついでSi,Crの順に大きい。

* 技術研究所 新材料・粉末研究グループ

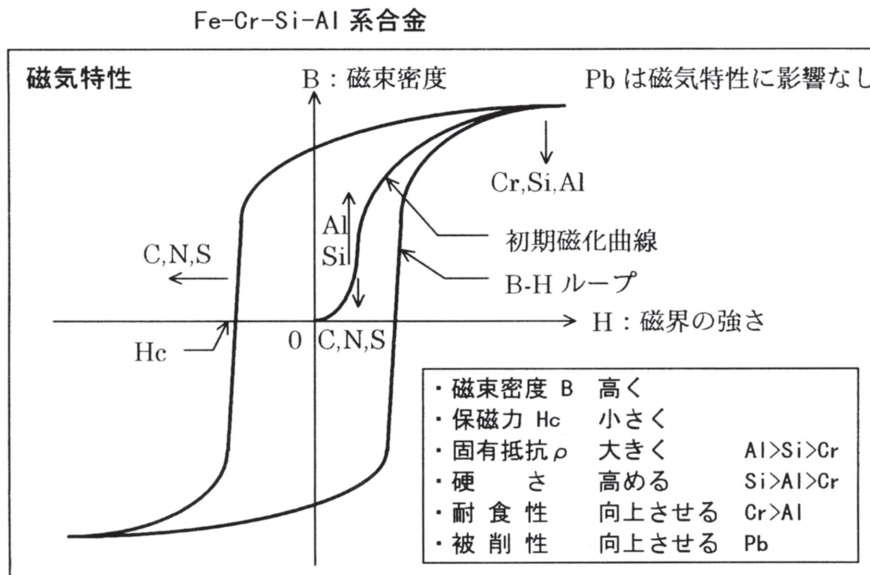


図2 合金元素の作用

3・3 硬さ

添加量1%あたりの硬さ増加率はSiが最も大きく、ついでAl, Crの順に大きい。合金元素のうち、Siは固有抵抗増加、磁気特性改善に効果的であり、硬さを増加させ耐摩耗性の向上に有効である。しかしながら添加量が多すぎると材料が脆弱化する。一方AlはSiと同様に固有抵抗を増加させ、磁気特性を改善するが、Siに比べて硬さを増加させる作用は少ない。SiのかわりにAlを添加することによって、高い固有抵抗、良好な磁気特性を維持しつつ硬さを低減することができ、冷間鍛造用途に適した材料となる。

3・4 耐食性

Fe基合金においては一般的にCrを添加することによって耐食性が向上することが知られている。これはCrを添加することにより表面に緻密で強固な薄い酸化保護皮膜（不動態皮膜）が形成されるためである。また、電磁ステンレス鋼においては、今までの研究からAlの添加も耐食性向上に有効であることが分かっている。一方CやNなどの不純物が鋼中に多く含有されると、CrはCやNと結合し、酸化保護皮膜を形成するための有効Cr量が減少し、耐食性が劣化する。また、Sが多く含有されると水溶性の介在物であるMnSを形成し、耐食性が劣化する。この様な観点から、QMRシリーズでは耐食性に悪影響を及ぼすC, N, Sを低減し、Cr添加量を調整して用途に応じた耐食性を付与している。

3・5 被削性

快削元素であるPb, Sを添加することにより被削性は改善される。Sは被削性改善に有効な元素であるが、多く含有されると磁気特性を劣化させる。一方、Pbは被削性改善に有効な元素であるとともに磁気特性に悪影響を及ぼさないので、磁気特性と被削性両立の点からはSよりもPb添加の方が有効である。

3・6 合金元素のバランス

以上のように、各種特性に及ぼす合金元素の影響は複雑であり、一方の特性を重視すればもう一方の特性に悪影響が出てくる場合もある。要求されるすべての特性を満足するためには、各特性を考慮し、添加元素の種類およびその成分バランスに工夫が必要となってくる。

4. QMRシリーズの特徴

当社では今までに種々の検討を行ない、前述のような合金元素の作用を明らかにして材料開発を行い、QMRシリーズの商品化を行ってきた。ここではQMRシリーズ各鋼種の特徴について示す。QMRシリーズの概要および各種特性を表1～3および図3～6に示す。

4・1 QMR1L

QMR1Lは耐食性向上に有効なCrを少量添加したものであり、比較的軽度の腐食環境である油圧機器の鉄心に適している。また、湿潤環境での耐錆性が良好であるため、部

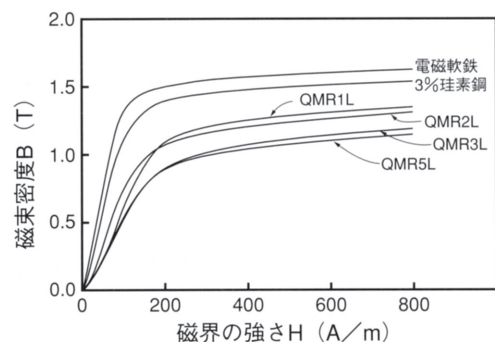


図3 磁気特性（初期磁化曲線）

表1 電磁ステンレス鋼QMRシリーズの概要

鋼種	主成分	磁気特性	固有抵抗	耐食性	被削性	冷鍛性	耐摩耗性	用途例
電磁軟鉄	Fe	◎	×	×	×	◎	×	各種エレクトロニクス 関連部品
3%珪素鋼	Fe-3Si	◎	△	×	×	○	◎	各種エレクトロニクス 関連部品
QMR1L	Fe-7Cr-2Si-0.6Al-Pb系	◎	○	△	◎	△	◎	電磁弁鉄芯（油圧） 交流ソレノイド
QMR2L	Fe-10Cr-1.2Al-Pb系	◎	○	○	○	◎	△	電磁弁鉄芯 カーエレクトロニクス関連部品
QMR3L	Fe-13Cr-0.3Si-1.0Al-Pb系	○	○	○	○	○	○	電磁弁鉄芯 カーエレクトロニクス関連部品
QMR5L	Fe-15Cr-1.5Si-1.0Al-Pb系	○	◎	◎	◎	△	◎	電磁弁鉄芯 各種センサー

◎秀（特にすぐれている） ○（すぐれている） △良 ×不適

表2 QMRシリーズの特性（一例）

鋼種	硬さ HRB	固有抵抗 ρ ($\mu\Omega \cdot m$)	850°C-4h熱処理後					Hc (A/m)
			B ₂ (T)	B ₅ (T)	B ₁₀ (T)	B ₂₅ (T)		
電磁軟鉄	42	0.11	1.49	1.58	1.63	1.69	25.5	
3%珪素鋼	86	0.46	1.36	1.49	1.54	1.62	23.9	
QMR1L	85	0.86	0.68	1.21	1.31	1.41	111.4	
QMR2L	60	0.73	0.98	1.19	1.29	1.39	71.6	
QMR3L	73	0.81	0.80	1.05	1.16	1.26	75.6	
QMR5L	88	0.99	0.64	0.98	1.10	1.21	95.5	

備考：B₂, B₅, B₁₀, B₂₅は、それぞれ磁界の強さ159.2A/m, 398A/m, 796A/m, 1990A/m
における磁束密度を表す記号。（1A/m=4 π /10³Oe, 1T=10⁴G）

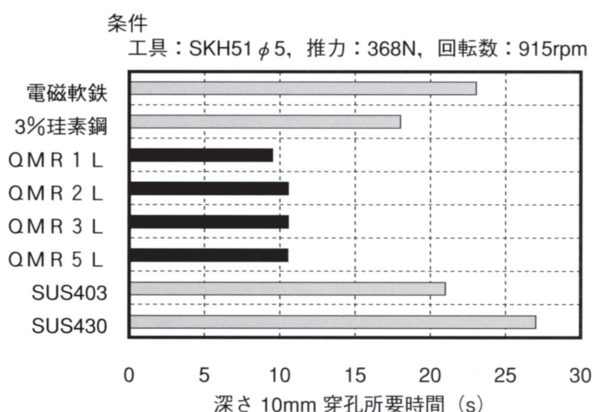


図4 被削性（ドリル穿孔性）

品加工工程における発錆を防止する場合にも適している。QMR1Lは85HRB程度の高硬度を有しており、特に電磁弁の鉄心用途においては耐摩耗性に優れ、電磁弁寿命を向上させるといふ利点がある。固有抵抗も0.86 $\mu\Omega \cdot m$ と高く、

交流用途においては消費電力の低減が期待でき、磁束密度が高いので直流用途にも適している。被削性についても快削元素Pbの添加により電磁軟鉄や3%珪素鋼に比べて穿孔所要時間が約半分になり、被削性が改善されている。そのすぐれた特性により図7に示すような電磁弁に使用されている。

4・2 QMR2L

QMR2Lは特に冷間鍛造用として開発したもので、硬さを増加させ冷間鍛造性に悪影響を及ぼすSiを極低に抑え、固有抵抗増加、耐食性改善に効果的なAlを積極添加している。これにより10Cr系でありながら13Cr鋼並の耐食性を維持しつつ、冷間鍛造性を改善している。その結果冷間鍛造の際に、「一度に大きな冷間加工度をとることができる」、「成形工具の負荷が軽減され、工具の寿命向上に寄与できる」、「中間焼鈍の省略」などの利点が期待でき、小型・複雑形状の過酷な冷間鍛造に適用が可能である。その高い回

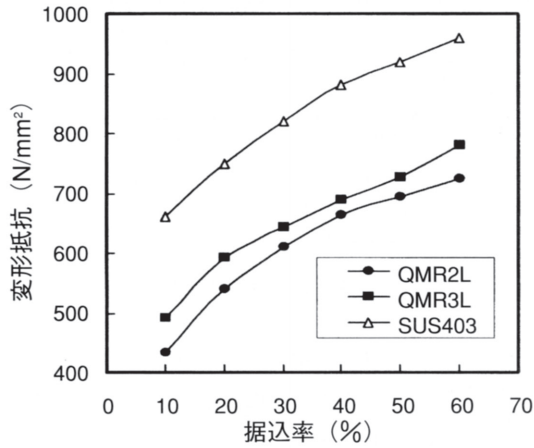


図5 冷間鍛造性（変形抵抗曲線）

有抵抗，優れた磁気特性により，例えば図8に示すような自動車の電子制御式燃料噴射装置（インジェクター）に使用されている。

4・3 QMR3L

QMR3Lも冷間鍛造用に開発したもので，Siを低減して硬さを低く抑えることにより冷間鍛造性を改善しているため，工程合理化が可能となる。QMR3LはQMR2Lに比べて耐食性を重視した成分設定になっており，13Cr系ステンレス鋼レベル以上の耐食性を有している。また高い固有抵抗，良好な磁気特性を有し，空圧電磁弁あるいは各種流体制御用機器の鉄心材料に好適である。

4・4 QMR5L

QMR5Lはシリーズ中最も優れた耐食性と $0.99\mu\Omega\cdot m$ の高い固有抵抗を有した材料である。良好な耐食性が必要とされる空気，ガス，水，油などの流体制御弁などに適してお

試験内容 鋼種	NaCl濃度 (35°C, 16h)		
	50ppm	0.1%	5%
電磁軟鉄			
3%珪素鋼			
QMR1L			
QMR2L			
QMR3L			
QMR5L			
SUS403(13Cr)	—	—	
SUS430(17Cr)			

図6 塩水噴霧試験

表3 耐食性

試験内容 鋼種	(腐食減量: $g/m^2 \cdot h$)			
	3%NaCl 60°C, 24h	5%HCl, 5%H ₂ SO ₄ , 5%HNO ₃ 25°C, 24h, 2回		
		2.8	25	37
QMR1L	—	2.8	25	37
QMR2L	0.13	2.5	8.5	0.77
QMR3L	0.05	2.0	5.3	0.16
QMR5L	<0.02	2.0	3.7	<0.02
SUS403 (13Cr)	0.18	9.3	103	12
SUS430 (17Cr)	0.21	15.5	28.1	0.34

り、交流で使用した場合には消費電力の低減が期待できる。88HRBという高硬度を有しているため電磁弁の寿命向上に寄与できる。また、QMR5Lは快削元素Pbの添加によりSUS403、SUS430に比べ穿孔所要時間が約半分になっており、被削性も改善されている。電磁弁以外の用途としては、その特徴を活かし、近年急速に普及しつつある自動車用ABSセンサーの回転数検出コイルのポールピースに使用されている。

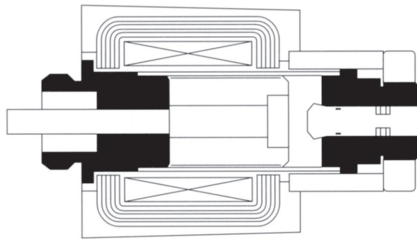


図7 電磁弁の構造の一例（黒塗部：QMR1L,3L,5L）

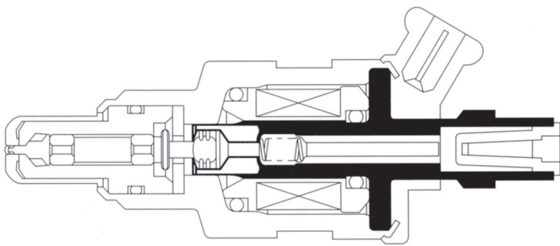


図8 インジェクターの構造の一例（黒塗部：QMR2L）

5. むすび

以上、山陽特殊製鋼の電磁ステンレス鋼QMRシリーズについて紹介した。図9に示すように、QMRシリーズはその優れた特性により年々販売量を伸ばしてきており、これからもエレクトロニクス・メカトロニクスの進展、多様化により使用量が増加するものと期待される。今後も油圧・空圧制御機器、各種センサー等において、多様化する用途に応じた機器の開発、実機特性改善、加工工程簡略化に貢献できる素材を開発、提供していく所存である。

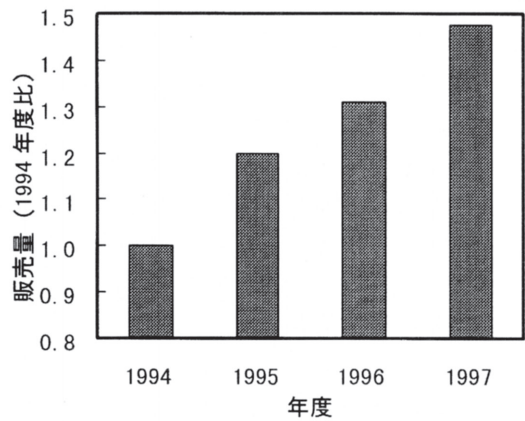


図9 販売量の推移

