

# 討24 高Mn系非磁性鋼の磁氣的性質におよぼす熱処理および冷間加工の影響

(株)神戸製鋼所 加古川製鉄所 佐伯 修

中央研究所(工博) 高田 寿 須藤正俊 大木継秋

## 1 緒 言

高Mn系非磁性鋼はオーステナイト系ステンレス鋼と比較して、透磁率が低い事、強度が高い事、製造コストが低廉である事の3つの点で優れており、核融合部材やリニャモーターカー用部材に使用されている。これまでに14% Mn-2% Cr鋼を基本鋼とし冷間加工および熱処理を加えた場合の磁気特性変化におよぼすC, Mn, Ni, Siの影響について報告した<sup>1) 2)</sup>。ここではこれらの結果をまとめて報告するとともに透磁率を上昇させる原因をさらに詳細に調査したので合せて報告する。

## 2 実験方法

供試鋼の化学成分を表1に示す。測定用試料は大気溶製した10kg鋼塊を1100℃~1200℃で11mmφに鍛造後1200℃×30分の溶体化処理を施し脱炭層を取除き9mmφとした。600℃の熱処理はソルトバス用を用い水焼入れ後化学研磨を行ない測定に供した。冷間加工は溶体化状態の棒状試料をインストロン引張り試験機により、30%までの歪を与えたものより均一変形部200mmを切出した。これらの試料について組織観察、磁気測定、X線回折、メスバウアー効果測定などを行なった。さらに熱処理により析出する炭化物のみを電解法により抽出しメスバウアー効果によりその磁性を調べた。

## 3 実験結果

### 3.1 冷間加工に伴う透磁率の変化

図1に冷間加工に伴う透磁率( $\mu$ )の変化を示す。Mn量を10~14%と変化させたM1~M4は加工度の増大に伴い $\mu$ は急激に上昇する。これはC量がおよそ0.5%と低いためと考えられる。

また、これらの材料の $\mu$ 上昇の傾向は必ずしもMn量の順になっていない。これはわずかなC量の差が原因であると思われる。冷間加工を行なったときの $\mu$ にはCの影響がきわめて大きいと考えられる。N添加鋼NA, NCはC量が0.4%とさらに少いためわずかの歪で $\mu$ は急上昇し0.07%程度のN添加ではあまり効果のない事がわかる。C添加0.25%の鋼は数%の加工で本実験に用いた装置では $\mu$ 測定不能となった。これらの結果よりC量が0.5%以下ではわずかの冷間加工により $\mu$ が1.02以上となる事がわかる。Ni, Siの添加ではその影響は現われなかった。加工による $\mu$ の上昇は $r$ が不安定であり、加工により $\alpha'$ が生成されるためであると考えられる。図2にNAに加工を施した試料のX線回折結果を示す。図から明らかに加工により $r$ 中に $\epsilon$ および $\alpha'$ が生じている事がわかる。加工材のメスバウアースペクトルをみると速度0の近傍に非磁性の $r$ と $\epsilon$ の重なりと考えられる吸収線が現われ、また磁気分裂による吸収線もわずかながら観察される。すなわち、強磁性物質である $\alpha'$ が加工により生成されていることがわかる。 $\epsilon$ 相は非磁性であることから $\mu$ の上昇は加工による $\alpha'$ の増大による事が確認された。

表1 供試鋼の化学成分

	C	Si	Mn	Cr	Ni	N
M1	0.51	0.56	14.40	2.16	—	0.013
M2	0.54	0.58	13.40	2.22	—	0.014
M3	0.48	0.60	12.00	2.18	—	0.017
M4	0.54	0.57	10.40	2.18	—	0.013
C1	0.25	0.63	13.84	2.04	—	0.043
C2	0.64	0.66	13.80	2.31	—	0.026
C3	0.75	0.69	14.05	2.13	—	0.036
N1	0.75	0.69	13.85	2.08	—	0.036
N2	0.53	0.20	14.24	2.08	1.04	0.027
N3	0.60	0.62	13.44	2.01	2.00	0.032
N4	0.74	0.62	13.84	2.04	3.16	0.031
S1	0.60	0.30	13.90	2.04	—	0.017
S2	0.70	1.34	14.40	2.06	—	0.018
S3	0.72	2.60	14.80	2.04	—	0.018
S4	0.70	3.51	14.50	2.02	—	0.019
NA	0.40	0.61	11.16	3.79	—	0.075
NC	0.41	0.62	14.00	2.14	—	0.059

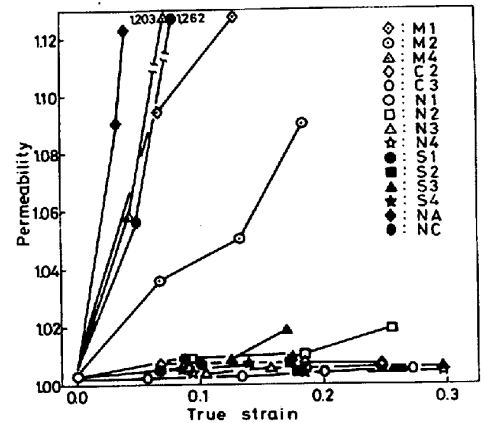


図1 冷間加工に伴う透磁率の変化

3.2. 熱処理に伴う透磁率の変化

600℃の熱処理を施すと熱処理時間とともにμが上昇してくるが、その上昇傾向は添加元素により異ってくる。図3にMnおよびSi添加鋼の熱処理によるμの変化を示す。Mn量の増加はμの上昇を遅らせる効果がありSi量の増加は速める効果のあることがわかる。また、ここには載せていないがNi量の増加はμの上昇を遅らせ、C量の増加は速める効果のある事を確認している。

図4に熱処理による組織の変化を示す。図にはS3の例を示した。以下S3についての結果のみ述べる。光学顕微鏡観察では他の材料も時間がずれるだけで同様の析出形態を示す。図から明らかなように熱処理時間とともに析出物量が増加しそれに伴いμが上昇していることがわかる。先にこの析出物が何であるかは問わずにそれがある磁気モーメントをもつものと考えて析出物量の時間変化をCahnの式で表わし磁化曲線をLangevinの関数にのるものと仮定し、実験により定数を定め磁化曲線の熱処理による変化の推定を試みた。そしてその磁化曲線の変化によりμの熱処理時間による変化の推定を試み、ある程度の予測が可能であると述べた。しかし、その後の調査によると短時間の熱処理では粒界に炭化物が析出し、長時間側では粒内にも炭化物とパーライト的な析出物が現われることが明らかとなった。また、析出する炭化物のみを電解法により抽出しX線回折により調べたところ、析出する炭化物は主としてM<sub>3</sub>C、M<sub>6</sub>C<sub>7</sub>およびM<sub>23</sub>C<sub>6</sub>タイプである事を解認した。その炭化物中のFe、Mn、Crの分析を行なったところ、図5に示すように熱処理とともに各成分は増加してゆくがMn/(Mn+Fe)も増加してゆくことが明らかとなった。

さらに、図6のS3：600℃×1000分熱処理材の透過電顕による観察結果に示すように長時間の熱処理で現われる析出物は炭化物とαの混合物であることを確認した。

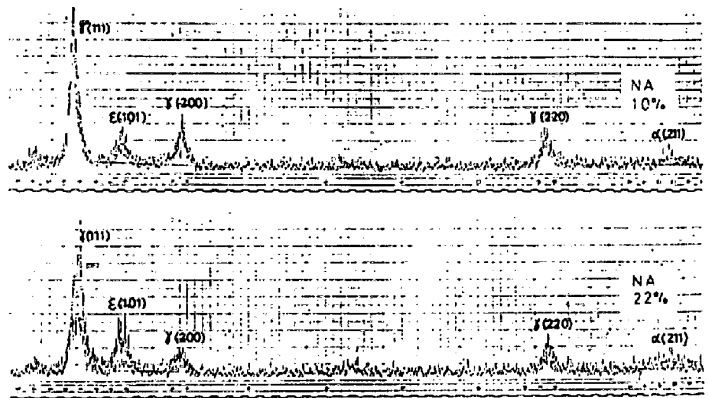


図2 冷間加工材のX線回折

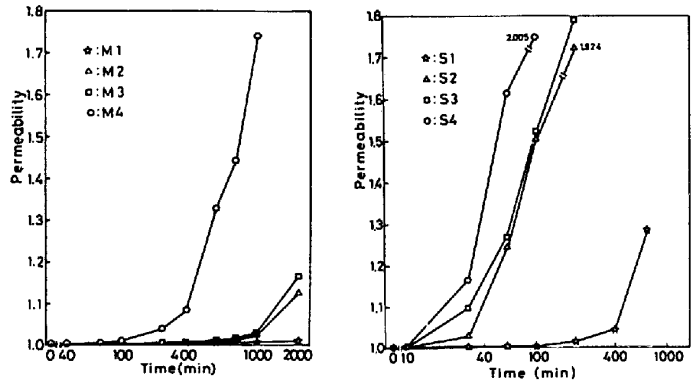
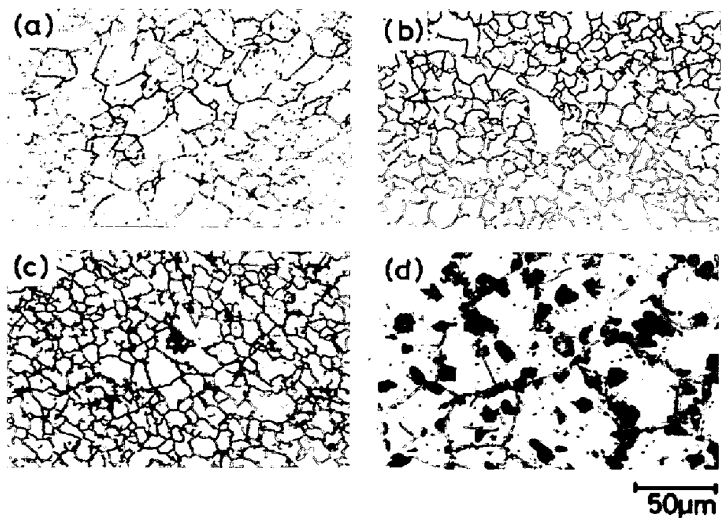


図3 熱処理に伴う透磁率の変化



(a) 600°C×10 min (b) 600°C×50 min  
(c) 600°C×100 min (d) 600°C×1000 min

図4 S3の熱処理による組織変化

図6 (a)は明視野像, (b)は電子線回折像の解析結果を示す。(b)は(d)における(110)斑点より得た $\alpha$ 相の暗視野像, (c)は同じく(d)における(331)斑点より得た炭化物の暗視野像である。ここに現われているのは $M_{23}C_6$ タイプの炭化物である。

以上の結果より析出物の増加による $\mu$ の上昇は析出物中の炭化物と $\alpha$ の寄与を分けて考えねばならないと考えられるので, メスbauer効果により各々の磁性を調べてみた。

まず, S3の600℃×1000分熱処理材より電解抽出した炭化物のみのメスbauerスペクトルをみると図7(b)に示すように非磁性である事が明らかとなった。

図7(a)に示すように $Fe_3C$ は強磁性物質であるが, 図5から炭化物中の $Mn/(Mn+Fe)$ は熱処理時間とともに上昇するため短時間の熱処理で析出する炭化物はFeの割合が高いことから

$Fe_3C$ の割合に近く強磁性の可能性があると考えられる。そこで短時間熱処理材の炭化物についてもメスbauer効果により, その磁性を調べたが磁気分裂による吸収線は現われなかった。一方, S3の熱処理材の薄膜試料を用いてメスbauer効果の測定を行なった結果,

短時間の熱処理では速度 $\nu$ 付近に現われる非磁性の吸収線のみであるが, 600℃×1000分では図7(c)に示すように磁気分裂による明確な吸収線が現われた。図7(b)に示すように炭化物は非磁性であることから熱処理材の $\mu$ を上昇させているのは析出物中の炭化物ではなく $\alpha$ である事が確認された。ただ短時間の熱処理によっても $\mu$ はわずかに上昇するが, 今回行なったX線回折および電顕観察結果からは $\alpha$ の存在を確認できなかった。そこで次に, 析出する $\alpha$ のみの量の推定を行なってみた。強磁性粒子が非磁性物質中に微細に分散すると超常磁性的挙動を示し, 磁化曲線はヒステリシスもなく残留磁気もない事が知られている。S3の短時間熱処理材の磁化曲線は残留磁気もなくヒステリシスも観察されなかった。そこで強磁性物質を担う物質は $\alpha$ のみとし, Langevin 関数にあてはめて飽和磁化および析出する $\alpha$ 量を求めてみた。なお, 熱処理時間とともに析出する $\alpha$ 中の成分濃度は変化すると考えられ, それに伴って自発磁化も変化すると考えられるが, メスbauer効果の測定結果より純鉄と比較して熱処理により析出する $\alpha$ の内部磁場があまり変らない

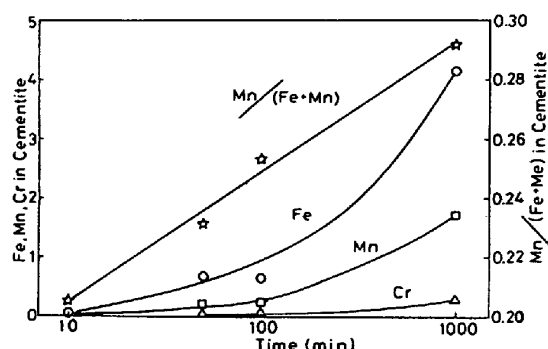


図5 S3の熱処理により析出する炭化物中のFe, Mn, Cr量の変化

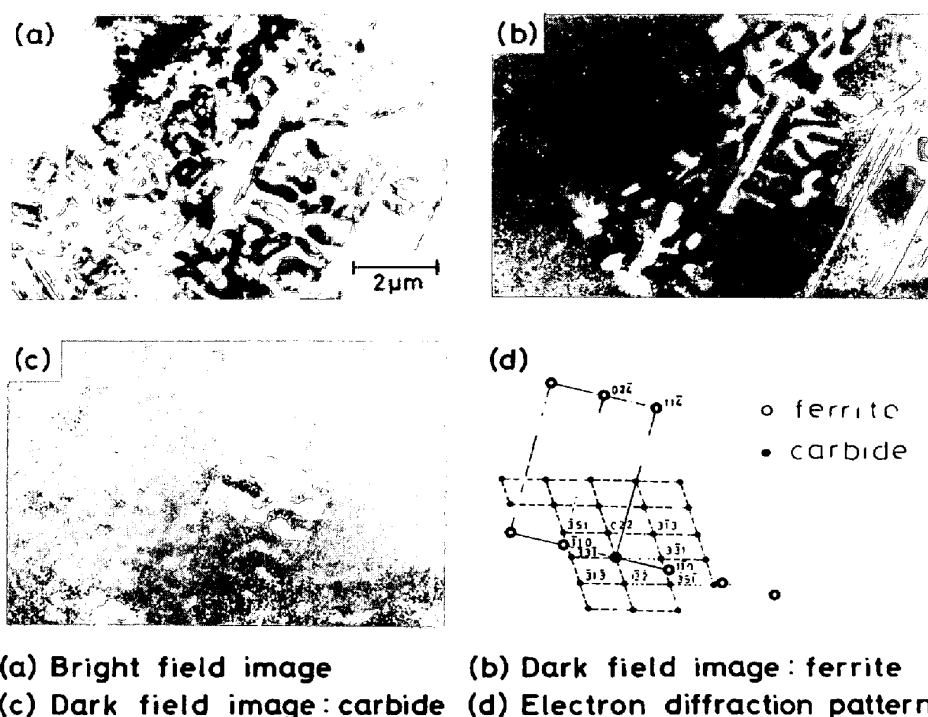


図6 S3: 600℃×1000分熱処理材の透過電顕組織

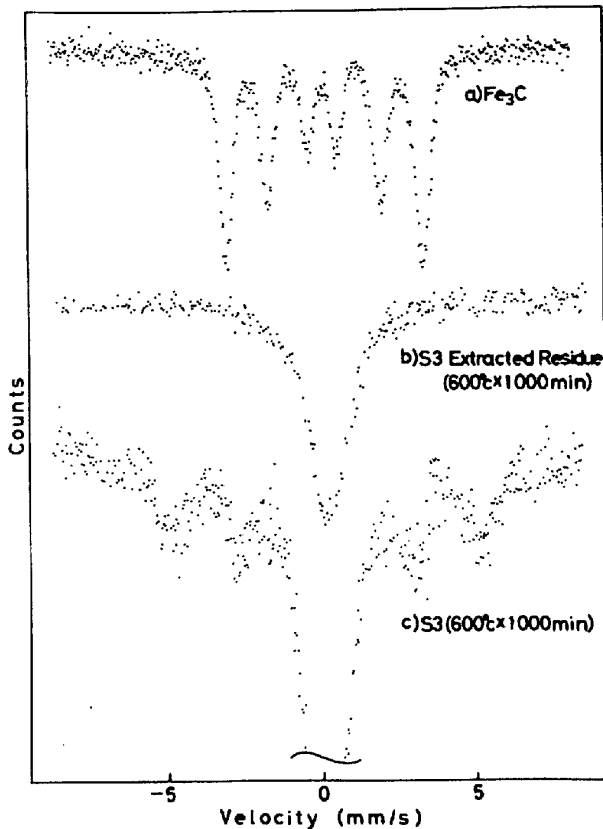


図7 (a) Fe<sub>3</sub>C, (b) S3 の 600°C × 1000 分熱処理材より抽出した炭化物 (c) S3 の 600°C × 1000 分熱処理材のメスbauer スペクトル

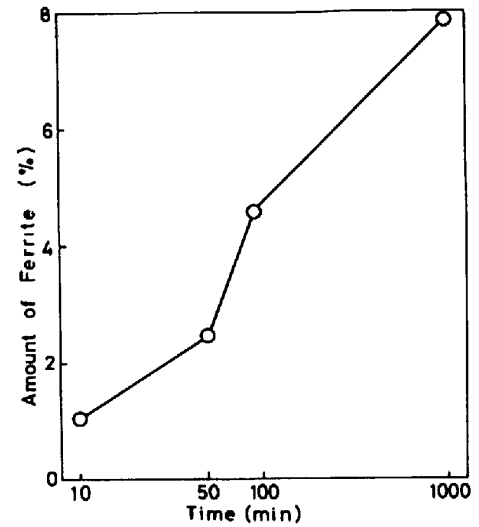


図8 S3 の熱処理により析出する α 量の熱処理時間による変化

ことから一定とした。図8には熱処理時間による α 量変化の計算結果を示す。この結果と先の μ 測定結果より α 量が 1.5~2% 程度となると、μ は 1.1 以上となることがわかる。

#### 4 結 言

高 Mn 鋼の冷間加工および熱処理に伴う磁氣的性質の変化を調べた結果、次の事が明らかとなった。

- 1) C 量の増加は γ を安定化し、冷間加工に対する μ の上昇をおさえるが熱処理に伴う μ の上昇をはやめる。
- 2) Mn および Ni 量の増加は熱処理に伴う μ の上昇を遅らせる。
- 3) Si 量の増加は熱処理に伴う μ の上昇をはやめる。
- 4) 冷間加工に伴う μ の上昇は加工誘起変態により現われる α' による。
- 5) 熱処理に伴う μ の上昇は炭化物とともに現われる α による。
- 6) 冷間加工、熱処理のいずれを施しても μ が 1.02 以上とならないための成分系は C : 0.6~0.65%, Mn : 13.5~14.5, Cr : 2%, Ni : 1% 前後がよい。

#### 参考文献

- 1) 高田ら ; 鉄と鋼 65 (1979) S 366
- 2) 須藤ら ; 鉄と鋼 66 (1980) S 352