最近の高マンガン非磁性鋼

沢 繁 樹*

1. はじめに

非磁性鋼とはその磁気的特性が強磁性でない鋼を総称した工業的な通称であり、磁気に感じない鋼のことで通常透磁率を目安としてその値が1.5以下のものを指している。その金属組織はステンレス鋼のCr-Ni系合金、高マンガン鋼のMn-Cr系合金いずれの場合もFCCオーステナイト相である。ただし、Fe-Ni系のいわゆるパーマロイと呼ばれる合金はFCC相であっても強磁性である。非磁性鋼の用途は従来主として電気機械用の材料や機器部品としてタービン発電機や誘導電機のエンドリング、回転子バインド線、ジャイロコンパス、鉄心締付スタッド、ブラウン管用非磁性電極、掃海艇用クランクシャフト類などであった。非磁性鋼が使用される目的は磁力線を乱したくない、磁場の乱れのために発熱しては困る、外部磁気をしゃへいしたくない、鉄粉の吸引をきらうなどがその主なものである。

近年、核融合炉(fusion reactor)や磁気浮上リニアモーター駆動方式の時速500 km/h (139 m/s) 超特急いわゆるリニアモーターカーが大規模なナショナルプロジェクトとして取り上げられるにいたり構造用強度部材としての高マンガン非磁性鋼への期待が急速に高まってきた。また最近では軌道用材料などの長尺製品に炭素鋼なみの熱膨張係数を有する高マンガン非磁性鋼が要求されるようになった。構造用強度部材としての要求特性は所定の強度を有しかつ経済的であることのほかに施工上から溶接性や被削性も重要となる。非磁性鋼の金属組織はオーステナイト相であるため一般に熱膨張係数が普通鋼にくらべ約40%大きい。したがって、気温の変化に伴う伸縮の度合いも大きくなるので長さが長い長尺圧延製品では継ぎ目の間隔を大きくとらねばならないし、鉄筋コンクリート棒鋼やボルトに使用する際にこのような大きな熱膨張係数は留意しなければならない点といわれて

いる。このような要望に応じて最近普通鋼なみの熱膨張係数を有する高マンガン非磁性鋼が開発され注目をあびた。

高マンガンオーステナイト鋼はクラッシャー、ライナーや交叉レールなどの耐磨耗用鋼として使用されることから分かるようにいちじるしく被削性がわるいので非磁性構造材料としては溶接性や靱延性などの所要特性を損なうことなく被削性のよい新鋼種が要望されその開発研究も盛んに行なわれている。高マンガン非磁性鋼は一般に安定オーステナイト鋼であり、溶接金属に δ フェライトが発生しないので溶接割れに対する対策が必要とされ溶接性を阻害する因子が研究され成果をあげている。

本稿では前述した大型プロジェクトをはじめとし石油掘削用ドリルカラーなど最近の新規需要に呼応して新しく開発された高マンガン非磁性鋼を概観し参考に供したい。

2. 高マンガン非磁性鋼の種類

Cr-Ni系や時効硬化型のCr-Ni-P系に属する非磁性鋼はもともとオーステナイト系ステンレス鋼である。この系のものは耐食性がよくしかもC含有量が少ないこともあって展延性に富むので深絞り製品やネジ製品などの冷間加工用非磁性鋼として使用される。しかし、この系の合金は高価なCr, Niを多量に含むこと、また冷間加工時に強磁性相の加工誘起 α' マルテンサイトが発生するのを抑制するにはさらに多量のNiを必要とすることから耐食性がとくに必要でない限り一般の構造用材料としては高価に過ぎよう。Cr-Ni系合金のNiの一部をMn, Cで置換したCr-Ni-Mn系に属するものもある。最近開発された高マンガン非磁性鋼は構造用材料として開発されたものがほとんどであるためCr-Ni系にくらべて低廉なFe-Mn-C系合金であり、これに少量のCr, Ni, Vなどがそれぞれの目的に応じて添加されている。表1にこれらの新しい高マンガン非磁性鋼とDIN規格のなかの同系統のものとをしめした。なお、JISには非磁性鋼の規格はなく電気バインド用非磁鋼線の品質規格JIS-

* 大同特殊鋼株式会社研究開発本部長
New Nonmagnetic High Manganese Structural Steels;
Shigeki Sawa(Daido Steel Co., Ltd., Nagoya)
1979年6月27日受理

表 1 最近の高マンガン非磁性鋼の化学組成.

鋼 種	化 学 組 成 (質量%)									備 考
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	その他	
DINX120Mn12	1.2	0.4	12.5	—	—	—	—	—	—	溶接用鋼板 鉄筋材
DINX45MnNiCrV13.7.6	0.45	1.0	〃	<0.08	<0.030	—	6.5	5.5	V 0.85	
0.7C-15Mn-1Ni	0.7	0.25	15.0	—	—	—	1.2	〃	〃	
0.7C-15Mn-1Ni-V	〃	〃	15.5	—	—	—	〃	〃	〃	
14Mn-2Cr-2Ni ⁽¹⁾	〃	〃	14.0	—	—	—	2.0	2.0	〃	
0.9C-14Mn ⁽²⁾	0.85	0.20	13.00	—	—	—	—	—	—	ASTM-A289B
	~1.00	~0.50	~16.00	—	—	—	—	—	—	
DINX55MnNiCr14	0.55	0.5	14.0	—	—	—	5.8	3.5	—	
18Mn-5Cr	0.50	0.42	18.0	≤0.08	≤0.025	—	≤2.00	4.8	—	
DINX40MnCr18	0.40	0.55	〃	—	—	—	—	4.0	N 0.10	
0.35C-18Mn ⁽³⁾	0.37	0.32	18.4	—	0.019	—	—	—	—	低熱膨張材
DINX50MnCrV2014	0.50	≤1.0	20.0	<0.1	<0.030	—	—	14.0	V 1.2, N 0.25	
24Mn-6Cr	0.6	〃	24	—	—	—	—	6	—	
24Mn-1.5Cr ⁽⁴⁾	0.24	〃	〃	—	—	—	—	1.5	—	
25Mn-5Cr-1Ni ⁽⁵⁾	0.16	0.23	24.5	0.025	0.006	—	1.07	5.03	—	

G2507 があるのみである。高マンガン非磁性鋼は Mn 量で区別すると 12Mn 系, 15Mn 系, 18Mn 系および 24Mn 系に大別される。12Mn 系は Mn 量が比較的少ないのでオーステナイトの安定性すなわち高温に加熱すると δ フェライトが生成する傾向, 焼入れや塑性加工を施すと α' マルテンサイトが発生する傾向を抑制するために多量の C や Ni の添加が必要である。この C の多量添加は製造性や耐溶接割れ性の劣化などの好ましくない特性劣化の原因である。したがって, 実際に使用されているのは 15Mn 系や 18Mn 系の合金がほとんどである。また, V, N は強化元素であり, Cr は大気中や塩水噴霧試験に対する耐食性を向上させるほか適量の添加は粒界炭化物の析出を抑制する。最近開発された 24Mn 系は炭素鋼なみの熱膨張係数を有している。また, 構造物材料として高マンガン非磁性鋼の最大の欠点とされていた溶接性や被削性を改善した鋼種も出現した。

図 1 Fe-Mn-C 合金の組織図(1223~1373 K 急冷).

図 1 は Fe-Mn-C 3 元系合金の組織図に表 1 の高マンガン非磁性鋼をプロットしたものである。

非磁性領域はオーステナイト γ 域と HCP ϵ' マルテンサイトとからなる $\gamma + \epsilon'$ 2 相領域である。 ϵ' は強磁性の α' に変態しやすいので図 1 にしめすように高マンガン非磁性鋼は γ 1 相域に位置する。

3. 高マンガン非磁性鋼の諸特性

(1) 物理的性質

表 2 に 15Mn 系および 18Mn 系高マンガン非磁性鋼の物理的性質を炭素鋼, 18Cr-8Ni ステンレス鋼 SUS 304 と比較してしめた。高マンガン非磁性鋼の物理的性質は熱膨張係数をのぞいて化学組成が変わってもそう大きな変化はなく, 炭素鋼とくらべると電気抵抗率は約 4 倍, 透磁率[†]は炭素鋼にくらべいちじるしく小さくまたヤング率はほぼ同程度の値である。高マンガン非磁性鋼の熱膨張係数は鋼組成依存性があり次の線形回帰式が報告されている⁽⁶⁾。

$$\bar{\alpha} = 11.9 + 5.5(\%C) - 0.15(\%Mn) + 5.2(\%Ni) \quad (1)$$

$\bar{\alpha}$ は温度 273~373 K での平均熱膨張係数で $10^{-6} K^{-1}$ の単位で示してある。このような Mn の増加による熱膨張係数の低下は収縮をともなう ϵ' マルテンサイト変態に関連した現象ではなく磁気変態に関連した現象である。FCC Fe-Mn 合金には低温で反強磁性/常磁性の磁気変態がしられており, この磁気変態点すなわちネール点 T_N 以下では正の大きな自発体積磁歪が発生し, この体積磁歪が熱膨張係数を小さくする原因である⁽⁷⁾。Fe-Ni 合金にみられるような強磁性インバー効果は平均価電子

[†] 本稿でいう透磁率とは真空中の透磁率に対する比すなわち比透磁率のことであり無次元の量である。したがって, CGS 単位でも SI 単位でも同じ値である。

^{††} ($\%X$) は成分 X の含有質量百分率を示す。

表2 高マンガン非磁性鋼の物理的性質.

鋼 種	電 気 抵 抗 率 ($n\Omega m$)	ヤ ン グ 率 (MPa)	平均熱膨張係数*1 (K^{-1})	透 磁 率*2	密 度 (kg/m^3)
0.7C-15Mn-1Ni	710	1.93×10^5	17.9×10^{-6}	1.02	7.90×10^3
X40MnCr18 (0.4C-18Mn-4Cr)	700	1.95×10^5	18.0×10^{-6}	1.02	7.90×10^3
炭 素 鋼 (0.23C-0.64Mn)	169	2.07×10^5	12.1×10^{-6}	150	7.85×10^3
SUS 304 (18Cr-8Ni)	730	1.93×10^5	17.3×10^{-6}	1.02	8.03×10^3

*1: 273~373 K の平均熱膨張係数

*2: 磁界の強さ 7.95 kA/m, 炭素鋼以外は標準熱処理状態

数(e/a)が $8.2 < e/a < 9.0$ で起るといわれているがこのような反強磁性インバー効果は原子1個当りの平均価電子数が8.0より小さいときにみられる⁽⁸⁾. Fe-Mn合金の反強磁性体積磁歪はいわゆるFe-Niインバー合金の強磁性体積磁歪のその約半分程度であり, Fe-Mn合金でこれまでにえられた最少の熱膨張係数は約 $8 \times 10^{-6}/K$ である⁽⁷⁾. この値はインバー合金として利用するにはいささか大きすぎる値であるが構造用高マンガン非磁性鋼として常温付近で炭素鋼程度の熱膨張係数 $12 \times 10^{-6}/K$ は十分えられるわけである. 図2は熱膨張係数と磁気変態との関係をしめした模式図である. 合金Aの温度 $T_1 \sim T_2$ 間の平均熱膨張係数 $\bar{\alpha}_A$ は $\Delta l_A / \Delta T$ であり, 合金Bのそれは $\Delta l_B / \Delta T$ で表わされる. ネール点は合金Aの場合 $T_1 < T_N^A < T_2$ であり, 合金Bの場合は $T_N^B < T_1$ である. 図中, 膨張曲線の T_N 以下の部分は磁気変態が起らない場合を点線で表わし, 実線で表わした磁気変態が起る場合の膨張曲線との伸びの差をハッチングで表わし

た, この差が自発体積磁歪に相当する. 温度 $T_1 \sim T_2$ 間での合金Aの自発体積磁歪 ω_A はB合金のそれ ω_B より大きいので合金Aの伸びの差 Δl_A は逆に合金Bのそれ Δl_B にくらべ小さい. したがって, この温度区間での平均熱膨張係数は合金Aの方が合金Bにくらべ小さい. ネール点が温度 T_2 より高温でもこの温度間の熱膨張係数は小さい. Fe-Mn合金のネール点は鋼組成に依存し, Mnはネール点を上昇せしめるがそれ以外の元素はすべてネール点を低下せしめる⁽⁹⁾. 通常の高マンガン非磁性鋼たとえば0.7C-15Mn鋼のネール点は180 K近辺, 0.5C-18Mn-5Cr鋼のそれは280 K近辺の値が報告されており⁽⁶⁾, 常温近辺の熱膨張係数を小さくするにはネール点を常温近くにまで上昇せしめればよいことになる. ネール点 $T_N(K)$ と合金元素量との間に式(2)のような線形回帰式が報告されている⁽⁶⁾.

$$T_N = 252.3 - 49.6(\%C) + 5.3(\%Mn) - 3.9(\%Cr) - 27.6(\%N) \quad (2)$$

図3は透磁率におよぼす冷間加工の影響をしめしたものである. オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 は不安定オーステナイト鋼でありわずかの加工を行っても加工誘起 α' マルテンサイトが発生するため透磁率が上昇する. α' の生成量はひずみの関数であり透磁率は加工誘起 α' マルテンサイトの発生量に対して直線的に増加する. 0.7C-15Mn系のRM 711, 18Mn-13Cr-3Ni系のX15MnCr 1813 いずれも同様の傾向をしめすが透磁率の増加の度合いはSUS 304にくらべて小さい. このことはオーステナイトの安定性の差に起因する. また, 0.6C-24Mn-6Cr鋼RM 801はMd点が常温よりかなり低い⁽¹²⁾安定オーステナイト鋼で加工誘起 α' マルテンサイトが発生しないので透磁率は増加しない. 透磁率は α' マルテンサイト変態以外にもオーステナイトが分解し強磁性のフェライトが生成すると増加することはいうまでもない. このことは応力除去焼鈍などの低温焼鈍時に問題となり, オーステナイトの分解と透磁率の変化はよく対応する⁽¹³⁾.

図2 熱膨張係数と磁気変態との関係.

図3 透磁率におよぼす冷間加工の影響。

(2) 機械的性質

非磁性鋼の DIN 規格によると高マンガン非磁性鋼の種類は強化方法で分類すると加工硬化型、固溶硬化型、時効硬化型の3つに分類される。加工硬化型の代表例がエンドリング材として用いられ Ni を含まない 18Mn-5Cr 鋼で ASTM-A 289 B や DIN-X40MnCr 18 がこの系統に属する。加工は再結晶温度以下の冷間加工や温間加工であり現在では降伏点が 882 MPa 以上のリングが製造されている。しかし、寸法的に小さいものにはこの強化法は容易であるが大型品では加工を均一に与えることがむづかしくまた非常に大型のプレスが必要とする。図4は 18Mn-5Cr 鋼の加工硬化曲線の1例である⁽¹⁴⁾。降伏点(0.2% 耐力)や引張強さは加工率が大いほどまた加工温度が低いほど大きい伸びや絞りには逆に低下する。とくに伸び、絞りの低下は加工温度が 923 K の場合にいちじるしい。

高マンガンオーステナイト鋼の加工硬化挙動は不明な点が多く、Hadfield 鋼(1.2C-13Mn)の大きな加工硬化は当初加工誘起マルテンサイト変態に起因すると考えられていた。その後、Hadfield 鋼はオーステナイトが安定で 4 K で加工してもマルテンサイトが発生しないことが分かり本鋼の加工硬化は積層欠陥などの格子欠陥の生成に起因すると考えられるようになった⁽¹⁵⁾。積層欠陥の生成傾向は積層欠陥エネルギーが小さいほど大きい。積層欠陥エネルギーは化学組成に依存し、Fe-Mn 合金の積層欠陥エネルギーは図5に示すようにある Mn 量で最小値をしめすが研究者により積層欠陥エネルギーが最小となる Mn 量がことなっている。積層欠陥エネルギ

図4 18Mn-5Cr 鋼の機械的性質におよぼす加工条件の影響⁽¹⁴⁾。

図5 Fe-Mn 合金の積層欠陥エネルギーにおよぼす Mn の影響。

ーは Hadfield 鋼と同じ Mn 量の場合にもっとも小さいとする報告もある⁽¹⁶⁾。

また、Fe-Mn-Cr 合金の研究によると積層欠陥エネルギーが小さいほど加工硬化挙動が大きい⁽¹⁸⁾。積層欠陥エネルギーが小さくなると積層欠陥の幅がより広くなりかつその分布もより密になることが高マンガンオーステナイト鋼でしられている⁽¹⁹⁾。積層欠陥の幅が広いと拡張転位が収縮するに際してそれだけ余分のエネルギーを必要とするので交差すべりが起りにくくなり加工硬化が大きくなる。実際には圧延終止温度は製品断面積が小さいほど再結晶温度以下に低下する傾向が大きいので、加工硬化も大きくなり圧延材の強度は固溶化焼なまし状態の強度にくらべかなり大きい。加工硬化の度合いは圧延終止温度が低いほど大きい⁽²⁰⁾。

高マンガン非磁性鋼の強化法として浸入型元素 C, N の添加による固溶硬化が有効なことはいうまでもない。

しかし、製造性、溶接性、加工性の点からその添加量を抑制する必要がある場合には他の合金元素による強化を計らなければならない。図 6 および図 7 はそれぞれ 0.7C-15Mn-1Ni 鋼の 0.2% 耐力、引張強さにおよぼす各種合金元素の影響をしめたものである⁽²¹⁾。フェライト形成元素 V, Mo, Cr の添加はいずれも強度を増加せしめる。とくに V の効果は Fe-Cr-Ni 系オーステナイト系ステンレス鋼の場合にしられている V の効果⁽²²⁾にくらべていちじるしく大きい。Fe-Mn-C 合金の場合には V の添加による V 炭化物の析出や結晶粒の微細化なども強度上昇に寄与しているものと考えられる⁽²¹⁾。固溶化熱処理状態の 0.2% 耐力 (MPa) と各種合金元素の添加量との間に式 (3) の線形回帰式が報告されている⁽²¹⁾。

$$0.2\% \text{ 耐力} = 213.6 + 158.8(\%C) + 19.6(\%Cr) + 30.4(\%Mo) + 107.8(\%V) \quad (3)$$

Fe-Mn-C 合金に V を添加するといちじるしい時効硬

図 6 0.7C-15Mn-1Ni 鋼の 0.2% 耐力におよぼす各種合金元素の影響⁽²¹⁾。

図 7 0.7C-15Mn-1Ni 鋼の引張強さにおよぼす各種合金元素の影響⁽²¹⁾。

化が起るこの現象を利用した時効硬化型非磁性鋼は工具用などに使用されている。DIN 規格では V を 1% 以上添加した X50MnCrV2014 鋼 (0.5C-20Mn-14Cr-1.2V) などが規格化されている。一方、時効後の降伏点が 1000 MPa を越えるものも報告されている⁽²³⁾。しかし、時効硬化型鋼は長さの長いものや大断面の製品には熱処理設備上の点や長時間加熱から生じる靱延性の低下などから構造用材料としては一般的ではなくむしろ小中部品に適用される場合が多い。

C 量が多い高マンガンオーステナイト鋼は 873 K 近辺の温度に加熱するとオーステナイトが分解する⁽²⁴⁾。オーステナイトの分解にともなう機械的性質の変化は靱延性の低下という点で比較的低温での焼鈍を行なう場合や溶接後の応力除去焼鈍を行なう場合に問題である。また、寸法形状が大きいものを高温から急冷する場合に 873 K 近辺の冷却速度が遅くなりオーステナイトの分解が懸念さ

図 8 0.7C-15Mn-1Ni 鋼の衝撃値におよぼす加熱温度、時間の影響⁽¹³⁾。

れるような場合にもしばしば問題となる。図 8 は固溶化焼なまし状態の 0.7C-15Mn-1Ni 鋼の衝撃値におよぼす加熱温度、加熱時間の影響をしめたものであり 875~900 K 近辺に衝撃値のノーズがみとめられる。この衝撃値のノーズ温度は粒界炭化物の析出やオーステナイト粒界でのフェライトの生成すなわちオーステナイト分解に関連した現象であると考えられている。Fe-Cr-Ni 系オーステナイト系ステンレス鋼の場合も粒界炭化物が析出すると衝撃値が低下する傾向が知られており破壊型式はいずれも粒界破壊である。

表 3 は最近報告された高マンガン非磁性鋼の機械的性質をしめたものである。表中備考欄に熱処理条件を明記していないものはすべて圧延ままでの特性値である。

(3) 被 削 性

高マンガン非磁性鋼が構造用材料として注目されるようになったことからその欠点とされた被削性を改善するための研究が行なわれるようになった⁽²⁵⁾。

表3 高マンガン非磁性鋼の鋼種別、形態別機械的性質。

鋼 種 記 号	形 状	寸 法 (mm)	0.2% 耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	衝 撃 値 (MJ/m ²)	備 考
0.7C-15Mn-1Ni	ボルト 等辺山形鋼 H 形 鋼	M28×80 60×60×50 B203×H474.5×t22	—	864.0	—	—	—	熱鍛ボルト Lアングル
			338.3 382.5	917.9 921.9	45.6 46.0	29.0 40.0	—	
18Mn-5Cr (ASTM-A289B)	圧延棒鋼 鍛造品	φ65 1000×1000×1000	371.7 323.1	900.3 907.1	56.8 48.9	70.8 65.9	2.75 1.35	1353 K 水冷
14Mn-2Cr-2Ni ⁽¹⁾	板 板	板厚 40 板厚 200	387.4 343.2	888.5 809.1	69 71	—	2.4 2.3	C 方向 C 方向
0.7C-15Mn-1Ni-0.6V	圧延棒鋼 パイプ	φ30 外径 120 内径 60 長さ 3100	432.5	956.2	62.4	48.5	1.28	1373 K 水冷- 973 K 時効
			498.2	1031.7	46.0	39.0	1.38	
X50MnCrV2014 (DIN-17006)	小中部品用		≥686.5	980.7 1961.4	≥25	—	0.40	1423 K 水冷- 833 K 時効

図9 各種快削高マンガン非磁性鋼の工具寿命曲線。

図9は最近開発された快削高マンガン非磁性鋼の工具寿命曲線の一例をしめしたものである。0.7C-15Mn-1Ni 鋼とその快削鋼は固溶化焼なまし状態、他のものはすべて固溶化焼なまし後 973 K で時効処理をした場合の結果である。快削鋼の場合の工具寿命はそうでないものにくらべていずれも長い。

図10は15Mn系の0.7C-15Mn-1Ni 鋼およびその快削鋼についてのドリル寿命を被削材の硬さで整理したものである。硬さが大きいほどドリル寿命は低下するが同一硬さにおける寿命はもちろん快削鋼の方が長い。ドリル寿命 L (m) とブリネル硬さ H_B との間には式(4)が成立する。

$$H_B \times L^{0.053} = C \quad (4)$$

ただし C は定数であり被削性が良いものほどこの値は大きい。通常の構造用鋼の場合にも $H_B \times L^n = C$ の関係が知られており、たとえば S45C の場合 n の値は 0.1~0.3、 C の値は 300~500 程度の値が知られている。高マンガン非磁性鋼のように n の値が小さいと工具寿命に対する硬さの影響がより大きくあらわれる。

一般に高炭素高マンガンオーステナイト鋼は切削温度がいちじるしく高く⁽²⁵⁾、同じオーステナイト系の Fe-Cr-Ni 系ステンレス鋼よりも高い。このような点から

図10 ドリル寿命におよぼす被削材のかたさの影響。

工具材質として超硬工具が望ましい。少量のS添加はこの切削温度を下げるのに効果があり、高速切削ではステンレス鋼の切削抵抗よりも小さくなる。また、高マンガン非磁性鋼は前述したように加工硬化の傾向が大きいため、たとえばドリル穴あけ加工の場合送り量がドリル加工自体から発生した加工硬化層より小さいと加工硬化層を削ることになるので、それより送り量大きい場合にくらべてドリル寿命はかえって短い。これなども高マンガン非磁性鋼の切削条件を選定するに当たって留意すべき点である。快削鋼とそうでないものとの切削抵抗の差は低速側でより大きいが高速側ではやや小さくなる。しかし、両者の送り分力の差の方が主分力の差より大きい。高マンガン非磁性鋼の切削加工事例は極めて少ない。また切削加工の条件は極めて多様であり工具材質やその形状などの切削条件の検討を含めた被削性改善の研究は今後に期待したい。

(4) 溶 接 性

高マンガン非磁性鋼は Cr を多量に含有するものを除いて通常安定オーステナイト鋼であり溶接金属に δ フェライトが生じない。このことは溶接継手部の透磁率を増加せしめないという意味から望ましいことである。C 量を変えて溶接 2 番部の耐割れ性をしらべた報告によると C 量が 0.7% 以下であれば割れは発生しないとされている⁽²⁶⁾。また 14Mn-2Cr 鋼の圧延まよび 873 K での応力除去焼鈍後の機械的性質は C 量が 0.6% の場合に最適であると報告されている⁽¹⁾。

図 11 は 0.7C-15Mn-1Ni 鋼の Trans-varestraint 割れ試験を行なって耐割れ性におよぼす P, S の影響をしらべたものである。割れ長さに対する S の影響はきわめてわずかであるが、P の影響は顕著で P 量に対して割れ長さは直線的に増加する。

表 4 は表 1 にしめた各種高マンガン非磁性鋼についての溶接継手部の機械的性質および透磁率を溶接法ごとにしめたものである。いずれも溶接欠陥はみとめられ

図 11 Transvarestraint 割れ試験の全割れ長さにおよぼす P, S の影響。

ていない。0.2% 耐力は 294 MPa (30 kg/mm²) 以上、引張強さは 588 MPa (60 kg/mm²) 以上の値であり、いずれもほぼ母材なみである。衝撃値は溶接金属、ポンド部、熱影響部いずれの場合とも 0.7C-16Mn-2Cr 鋼の場合をのぞいて 100 J 以上の値をしめす。また透磁率は溶接のままで 1.002 と低い値をしめす。応力除去焼鈍は ASTM-A289 では 574~616 K で行なうよう規定されているが温度が低いので残留応力の低下は十分ではない。14Mn-2Cr-2Ni 鋼では 973~1023 K の温度範囲が適正温度であるとされている⁽²⁹⁾。応力除去焼鈍はオーステナイト分解の TTT 曲線のノーズ温度をさけて行なわれる。理由は前述したようにオーステナイトの分解にともなって靱延性が劣化したり、透磁率の増加が起るからである。このノーズ温度は鋼組成で変化し図 9 にしめたように 0.7C-15Mn-1Ni 鋼の等衝撃値曲線のノ

図 12 展開式すみ肉溶接割れ試験による各種溶接用材料の耐割れ性。

表 4 溶接継手の機械的性質と透磁率。

溶 接 法	鋼 種	溶 加 材	引張特性 (MPa)		衝 撃 値 (J)				溶接金属 の透磁率
			0.2% 耐 力	引 張 強 さ	溶 接 金 属	ポ ン ド 部	熱 影 響 部		
被覆アーク 溶接	0.7C-15Mn-1Ni-0.6V 14Mn-2Cr-2Ni ⁽¹⁾ 16Mn-2Cr ⁽²⁷⁾ 24Mn-6Cr 24Mn-1.5Cr ⁽²⁷⁾ 18Mn-5Cr ⁽²⁸⁾	0.6C-15Mn-4Ni	424.6	793.4	122.8	118.6	113.7	1.002	
		16Mn-16Cr-2Ni	—	—	105.8	130.3	169.5	1.005	
		〃	—	741.9	136.2	78.4	65.7	1.003	
		0.6C-15Mn-4Ni	434.4	814.9	125.4	159.7	183.3	1.002	
		16Mn-16Cr-2Ni	—	800.7	139.2	152.9	142.1	1.009	
		〃	—	758.1	135.2	121.5	177.4	1.005	
MIG 溶接	14Mn-2Cr-2Ni ⁽¹⁾	0.4C-14Mn-8.7Ni-2.5Cr	464.8	717.8	120.5	135.2	153.9	1.003	
電子ビーム 溶接	0.7Cr-15Mn-1Ni-0.6V 14Mn-2Cr-2Ni ⁽¹⁾ 16Mn-2Cr ⁽²⁷⁾ 24Mn-6Cr 24Mn-1.5Cr ⁽²⁷⁾	—	426.6	897.3	118.6	—	117.6	1.002	
		—	388.3	854.2	200.9	205.8	206.8	1.004	
		—	—	837.9	78.4	76.4	84.3	1.003	
		—	355.0	893.8	151.9	—	186.2	1.002	
		—	—	830.1	146.0	149.9	146.0	1.002	

表5 低熱膨張高マンガン非磁性鋼の諸特性.

鋼 種 名	熱 処 理 (寸 法)	物 理 的 性 質			機 械 的 性 質				
		平均熱膨張係数*1 (K ⁻¹)	透磁率*2	電気抵抗率 (nΩm)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸 び (%)	絞 り (%)	衝 撃 値 (MJ/m ²)
24Mn-6Cr ⁽⁶⁾	圧延のまま (φ13)	12×10 ⁻⁶	<1.01	778	440	950	53	50	2.1
	1373 K 水 冷(φ25)	12×10 ⁻⁶	<1.01	770	340	810	74	67	3.1
24Mn-1.5Cr ⁽⁴⁾		(10.5~11.5)×10 ⁻⁶	<1.0	734	397.9	839.9	55	60.2	2.3
25Mn-5Cr-1Ni ⁽⁵⁾		7.1×10 ⁻⁶ *3	1.001		397	739	56		2.25

*1: 273~373 K の平均熱膨張係数

*2: 磁界の強さ 7.95 kA/m

*3: 77~293 K の平均熱膨張係数

ズ温度は 875~900 K であるが V の 0.5% 添加はこのノーズ温度を約 200 K 上昇せしめる。高温ほど短時間の加熱でも残留応力の低下が大きいことはいうまでもないであろう。

図 12 は各種溶接用材料の耐割れ性をしらべるため展開式すみ肉溶接割れ試験 (JIS-Z3156) を行った結果である。高マンガン非磁性鋼用の溶接用材料として開発された 15Mn-4Ni 鋼の耐割れ性は溶接金属に δ フェライトを発生せしめて耐割れ性の向上を計った 16Mn-16Cr 鋼のそれと同程度である。δ フェライトの発生は透磁率が増加する点で好ましくないことはいうまでもない。また、同じく安定オーステナイト鋼の D310 は高い割れ発生率をしめす。

(5) 低熱膨張非磁性鋼

常温附近での熱膨張係数が炭素鋼なみで通常の高マンガン非磁性鋼より約 35% も小さい値を有する構造用高マンガン非磁性鋼が要望されるようになったことは前述したとおりである。表 5 は最近開発された低熱膨張非磁性鋼の物理的性質をしめたものである。24Mn-6Cr 鋼, 24Mn-1.5Cr 鋼また 25Mn-5Cr-1Ni 鋼いずれも 273~373 K の平均熱膨張係数は表 2 にしめた炭素鋼のそれと同程度である。このように 24Mn 系非磁性鋼の常温近辺の熱膨張係数が小さいのは前述したように常温で反強磁性オーステナイト相であるためである。これに対して 15Mn 系, 18Mn 系非磁性鋼やオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 などはいずれも常磁性オーステナイト相である。

4. お わ り に

最近開発された高マンガン非磁性鋼についての諸特性はまだ未公開のものも多いが本稿ではとくに最近の技術的成果に重点をおいてとりまとめた。また、非磁性異形鉄筋の機械的継手の一例としてスクイズ式鉄筋継手工法 (SJI 法) による継手の性能が報告されている⁽³⁰⁾が、本稿ではその内容が材料の話からやや逸脱するので省略し

た。高マンガンオーステナイト鋼についての研究は Fe-Cr-Ni 系オーステナイト鋼に関するものにくらべていちじるしく少ないのが現状であり、基本となる Fe-Mn-C 3 元素組織図もよく分かっていない。今後高マンガン非磁性鋼の需要が高まるにつれ特性に関する要求もよりきびしくなると考えられ、こうした基礎的データの充実も逐次行われていくものと思われる。これがまた新鋼種開発の誘因となってさらに発展することが期待される。

文 献

- (1) 笠松 裕, 石岡千里, 山香 誠, 平野宏通, 井原均, 清水真人: 鉄と鋼, **65** (1979), S 367.
- (2) 大野 鉄, 加藤 直, 高橋政司, 相原賢治: 住友金属, **30** (1978), 189.
- (3) 井上政文, 坂井一男: 特殊鋼, **28** (1979), No. 5, 21.
- (4) 大内千秋, 高坂洋司: 鉄と鋼, **65** (1979), S 374.
- (5) 桑辺行正: 特殊鋼, **28** (1979), No. 5, 38.
- (6) 加藤哲男, 藤倉正国, 矢萩慎一郎, 加藤俊宏: 電気製鋼, **50** (1979), 未刊.
- (7) 丹治雅典, 白川勇記: 日本金属学会誌, **34** (1970), 897.
- (8) F. Richter and W. Pepperhoff: Arch. Eisenhüttenw., **47** (1976), 45.
- (9) O. A. Khomenko, I. F. Khilkevich and Y. Zvigintseva: Fiz. Metal. Metalloved., **37** (1974), 186.
- (10) H. Dietrich: DEW-Technische Berichte, **4** (1964), 111.
- (11) 藤田輝夫: ステンレス鋼の熱処理, 日刊工業新聞社, (1977), 189.
- (12) T. Kato, S. Fukui, M. Fujikura and K. Ishida: Trans. ISIJ, **16** (1976), 673.
- (13) 加藤哲男, 藤倉正国, 矢萩慎一郎, 石田清仁: 電気製鋼, **49** (1978), 90.
- (14) 日下邦男: 特殊鋼, **9** (1960), 56.
- (15) H. M. Otte: Acta Met., **5** (1975), 514.
- (16) H. Schumann: J. Kristall, U. Technik, **10** (1974), 1141.
- (17) P. Y. Volosevich, V. N. Gridnev and Y. N. Petrov: Fiz. Metal. Metalloved., **42** (1976), 372.

- (18) T.Kato, S.Fukui, M.Fujikura and K.Ishida :
Tran. ISIJ, **16**(1976), 673.
- (19) D.J.Drobyak and J.G.Parr : Met. Trans, **1**
(1970), 759.
- (20) 肥後裕一 : 特殊鋼, **28**(1979), No.5, 11.
- (21) 加藤哲男, 藤倉正国, 川崎成人, 石田清仁 : 1979
年春期鉄鋼協会講演大会にて発表.
- (22) K. J. Ircrine, T. G. Landman and F. B.
Pichering : J. Iron Steel Inst., **207**(1969),
1017.
- (23) A. J. Lene : *Precipitation from Solid Solution*,
ASM, (1975), 295.
- (24) 今井勇之進, 齊藤利生 : 鉄と鋼, **47**(1961), 929
- (25) 加藤哲男, 阿部山尚三, 木村篤良 : 電気製鋼, **49**
(1978), 177.
- (26) 関口 晁, 竹内宥公, 木俣 登 : 未発表.
- (27) 大内千秋 : 特殊鋼, **28**(1979), No.5, 25.
- (28) 大谷泰夫, 岡田康孝, 三浦 実 : 鉄と鋼, **65**
(1979), S 373.
- (29) 笠松 裕, 山香 誠, 平野宏通, 井原 均, 湊
昭二, 西村勝士, 小川恒司 : 鉄と鋼, **65**(1979),
S 368.
- (30) 服部清治 : 昭和53年秋期日本建築学会学術講演
梗概集, 1885.

◆学協会だより◆

**18th International Conference on Heat
Treatment of Materials (ICHTM)**

主催 : International Federation for the Heat
Treatment of Materials Heat Treating Div.,
ASM

時 : 1980年5月6日～8日

所 : Detroit (U.S.A.)

照会先 : Technical Div., American Society for
Metals, Metals Park, Ohio 44073, U.S.A.

**International Conference on Production and
Use of Coil-Coated Strip**

主催 : The Metals Society

時 : 1980年6月5日～6日

所 : Birmingham (England)

アブストラクト・提出期限 : 1979年9月30日 (200～300
語)

照会先 : Mr. T.L.Hughes, The Metals Society,
1 Carlton House Terrace, London SW1Y
5 DB

**5th International Conference on Zirconium
in the Nuclear Industry**

主催 : ASTM

時 : 1980年8月4日～7日

所 : Boston (USA)

アブストラクト・提出期限 : 1979年10月29日 (500語
以内)

照会先 : Mr. H. M. Cobb, ASTM Standards De-
velopment Div., 1916 Race St., Philadel-
phia, Pa. 19103, U.S.A.