

## 討21 高Mn非磁性鋼の基本的特性と製品への応用

川崎製鉄㈱ 技術研究所 佐々木晃史 渡辺健次 ○野原清彦  
 近藤信行 小野寛  
 水島製鉄所 佐藤周三 一瀬功

### 1. 緒言

高Mn鋼は、従来よりハッドフィールド鋼(1C-13Mn)の例にみられるように耐摩耗鋼として知られているが、他方オーステナイト系ステンレス鋼と並んで非磁性鋼としても用いられてきた。最近ステンレス鋼に比べて安価でかつ加工や熱処理に対して安定な非磁性鋼が要求されるようになり、従来鋼の諸性質の改良を目的として高Mn鋼に関する研究・開発が積極的に行われている。

### 2. 高Mn非磁性鋼の物理的・機械的性質

#### 2.1 熱膨張と磁性

高Mn鋼はオーステナイト鋼であるため熱膨張係数( $\beta$ )が大きいという特徴がある。図1に0℃～100℃での平均熱膨張係数に対する基本成分のC, Mn(C≤1%, Mn=10～50%)の影響を示した。その特徴は以下のものである。①C濃度の減少に伴い熱膨張係数は低下する。②この減少率はMn=10～13%及び50%付近では小さく、その中間の組成では大きい。③Mn濃度の増加により熱膨張係数は減少する。④その減少率はMn=30～50%ではそれ以下の組成の場合より小さい。

高Mn鋼は磁気的には反強磁性を示し非磁性鋼となるものである。反強磁性体のパラメータであるネール温度( $T_N$ )への基本成分のC, Mnの影響を図2に示した。 $T_N$ はCの減少並びにMnの増加により上昇する。これらの結果から $\beta$ 並びに $T_N$ に対するC及びMnの寄与は次のような線型回帰式で表わすことができる。

$$\beta (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}) = 17.66 + 3.82\text{C}(\%) - 0.22\text{Mn}(\%)$$

$$T_N (^{\circ}\text{C}) = -190.8 - 67.6\text{C}(\%) + 11.0\text{Mn}(\%)$$

図3はいくつかの高Mn鋼に対して平均の熱膨張係数とネール温度との関係を示したものでよい対応があり、 $T_N$ の上昇と共に $\beta$ が低下する。このように高Mn鋼の熱膨張係数は磁性と密接に結びついている。このことはインバー(Invar)合金の熱膨張が極めて小さいことと知られているのと同じ理由によるものであり、ネール(またはキューリー)温度以下の温度では自発体積磁歪と呼ばれる磁気的原因による膨張のため通常の格子振動による体積変化が打ち消されて見掛け上熱膨張が小さくなるのである。

#### 2.2 機械的性質

C: 1%以下, Mn: 10～50%の高Mn鋼におけるC, Mnの機械的特性への影響を調べた。図4は室温(RT)の結果を示したものである。その特徴は次のようである。①1%までの範囲ではCの増加によりどのMn濃度でも強度、伸びとも上昇する。靱性はMn濃度により挙動が異なり13Mn鋼ではCの増加により向上し、50Mnでは逆の傾向を示し、24～30MnではあまりCに依存しない。②他方10～18%Mnまでは一般にMnが増加すると強度、

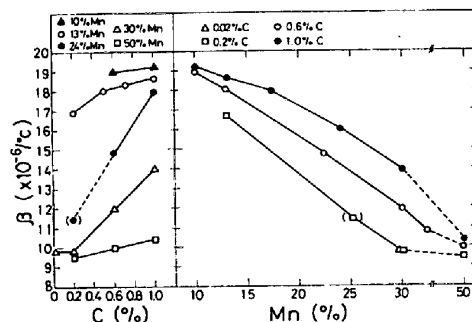


図1 熱膨張係数へのC, Mnの影響

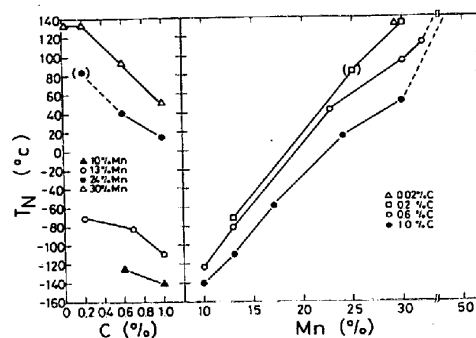


図2 ネール温度( $T_N$ )へのC, Mnの影響

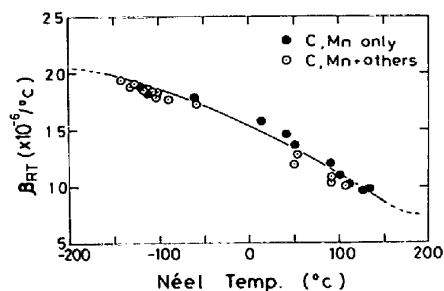


図3 高Mn鋼の $T_N$ と $\beta$ の関係

伸び、靱性とも上昇するが18~30%ではいずれの性質もほとんど一定値を保ち、さらに高Mnになるとむしろ特性が悪くなる傾向を示す。図5は-196℃での結果を示したもので①低温の場合Cの増加により強度が上昇するが、その程度はMn濃度の影響を強く受ける。②C一定のときのMnの影響は10~25%の範囲ではMnの増加とともに強度、伸び、靱性とも上昇するがそれ以上ではむしろ低下するという特徴がある。

### 3. 高Mn非磁性鋼の用途別鋼種例

以上の結果に基づいて高Mn非磁性鋼をその使用目的を考慮し、それぞれの目的に適するように基本成分であるC, Mnの範囲及び添加元素を選定することによって①低温用鋼②高強度鋼③一般用鋼のごとく分けて考えることができる。

#### 3.1 低温用鋼

低温での強度、靱性に重点を置いた場合、図5からMn濃度は23~30%が望ましいことが分る。この成分系は(γ+ε)2相域及びγ相との境界域に存在しているのが特徴である。表1の①欄に示すこの成分系の例について図6にRTと-196℃での機械的性質をまとめて示した。いずれの鋼種も延性・靱性に優れている。D, E鋼は耐力、靱性ともSUS316に匹敵しており延性がとくに優れている。この鋼種の特徴として低温での破断伸びが、室温の値より大きくなるものが多い。図には熱延まま材の結果の例をBについて示したが、延性・靱性の低下が少なく耐力の上昇が得られることもこの成分系の特徴である。

#### 3.2 高強度鋼

高Mn非磁性鋼でとくに高強度が要求される材料については、C: 0.6~1.0%, Mn: 30%をベースにした鋼種があげられる。この鋼種の場合Cr, Al, Niなどを添加することにより高強度で、かつ低温でも延性・靱性を良好にすることができる。表1の②欄に示すこの成分系の例について図7にRTと-196℃での機械的性質をまとめて示した。H, J鋼は耐力は13Mn鋼より高く靱性はSUS316よりも優れている。このようにこの成分系は13Mn鋼及びステンレス鋼の両者の長所を具備している点の特徴である。

#### 3.3 一般用鋼

先の2種類の中間的性格をもち、低温用から高温用までの広範囲の用途に適用できるもので現在0.6C-1.8Mn-5.5

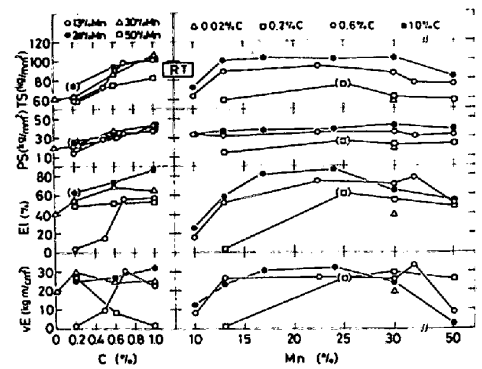


図4 室温の機械的性質へのC, Mnの影響

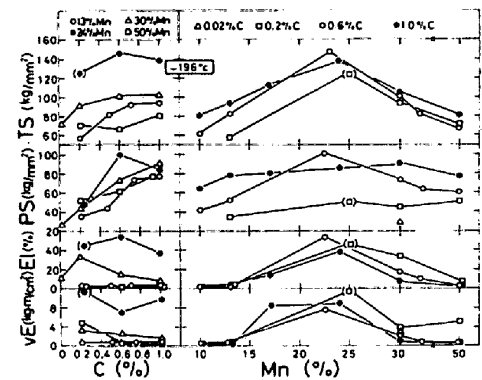


図5 -196℃の機械的性質へのC, Mnの影響

表1 低温用鋼(①), 高強度鋼(②)の組成

|   | C | Si   | Mn  | P    | S    | Cr    | その他           |
|---|---|------|-----|------|------|-------|---------------|
| ① | A | 0.02 | 0.5 | 28.0 | 0.02 | 0.005 | -             |
|   | B | 0.10 | 〃   | 〃    | 〃    | 〃     | Al1.5, V0.5   |
|   | C | 0.15 | 〃   | 24.0 | 〃    | 〃     | -             |
|   | D | 〃    | 〃   | 〃    | 〃    | 〃     | Al1.5         |
|   | E | 〃    | 〃   | 〃    | 〃    | 〃     | Al1.5, V0.5   |
| ② | F | 0.60 | 0.5 | 30.0 | 0.02 | 0.005 | 5.0           |
|   | G | 〃    | 〃   | 〃    | 〃    | 〃     | 7.0           |
|   | H | 〃    | 〃   | 〃    | 〃    | 〃     | Ni 2.0, Al3.0 |
|   | I | 〃    | 3.0 | 〃    | 〃    | 〃     | -             |
|   | J | 〃    | 〃   | 〃    | 〃    | 〃     | Ni 2.0        |

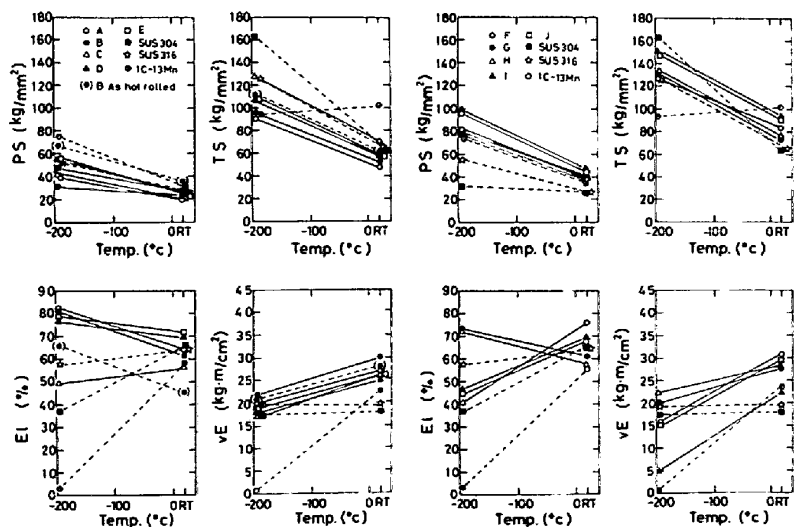


図6 低温用鋼の機械的特性

図7 高強度鋼の機械的特性

Cr-1Ni-(0.5V)系を用いている。この成分系の特性については後の高Mn非磁性鋼の応用例のところ(4.2項)で述べることにする。

### 4. 高Mn非磁性鋼の製品化と応用例

#### 4.1 高Mn非磁性鋼の製品化と材質試験

先に述べた実験結果をふまえ、高Mn非磁性鋼の現場製造技術の確立、種々の製品形状への適用、製品特性の把握などを目的として表2に示す鋼種について、5 ton真空誘導炉で溶解後、現場工程にてH形鋼、丸棒、異形棒鋼、

表2 高Mn非磁性鋼の各種製品とその特性

| 製品   | 鋼種          | 成分      |       |      |       |       |      | 製品サイズ<br>(mm)       | 製品位置<br>区分 | 物理的性質    |                                |                          | 機械的性質                      |         |
|------|-------------|---------|-------|------|-------|-------|------|---------------------|------------|----------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|---------|
|      |             | C       | Si    | Mn   | P     | S     | Cr   |                     |            | 透磁率<br>μ | 熱膨張係数<br>×10 <sup>-6</sup> /°C | 耐力<br>kg/mm <sup>2</sup> | 引張強度<br>kg/mm <sup>2</sup> | 伸び<br>% |
| H形鋼  | A 24Mn-5Cr* | 0.48    | 0.55  | 24.7 | 0.020 | 0.007 | 5.70 | H 512×212<br>×22×22 | フランジ1/4    | 1.002    | 12.2                           | 55                       | 96                         | 54      |
|      |             | ウエーブ1/2 | 1.002 | 12.1 | 62    | 101   | 46   |                     |            |          |                                |                          |                            |         |
|      | B 0.6C-30Mn | 0.59    | 0.56  | 30.5 | 0.013 | 0.006 | -    | 同上                  | フランジ1/4    | 1.002    | 11.1                           | 44                       | 90                         | 66      |
|      |             | ウエーブ1/2 | 1.002 | 11.1 | 52    | 92    | 61   |                     |            |          |                                |                          |                            |         |
| 丸棒   | 17Mn-3Cr**  | 0.48    | 0.46  | 16.7 | 0.020 | 0.006 | 3.1  | 5.5φ, 16φ, 80φ      | 16φ 1/2D   | 1.002    | 14.9                           | 39                       | 97                         | 57      |
| 異形棒鋼 | 24Mn-5Cr*   | 0.49    | 0.48  | 24.3 | 0.017 | 0.008 | 5.38 | D13, D25            | D13 1/2D   | 1.002    | 11.9                           | 35                       | 85                         | 67      |

\* DIN-X40MnCr23相当 \*\* DIN-X40MnCr18相当

板材を製造した。これら高Mn鋼は変形抵抗が大きいのが特徴であるが、いずれも既存の設備で製造することができた。表2に各製品の代表的位置での特性値を示すようにいずれも非磁性鋼として優れた

特性を確保できた。H形A鋼の場合の製品位置による特性値の変化を図8に示す。T, M, Bは各々鋼塊Top, Middle, Bottom相当部を意味しX, Yなどは図9にその位置を示した。T, B, X, 4各部での強度上昇が大きい。透磁率, 熱膨張係数は位置による変動はほとんどない。これら現場製造材に対して被削性試験の一つとしてドリル穴あけ試験を行った。その結果を図10に示す。30Mn鋼はハイスドリルによる穴あけが可能であるのが注目される。

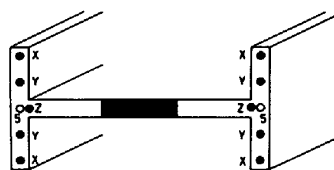


図9 H形鋼での試片採取位置

|   | ドリル | 先端角  | 送り          | 速度        |
|---|-----|------|-------------|-----------|
| ● | ハイス | 135° | 0.03 mm/rev | 4.4 m/min |
| ○ | 超硬  | 135° | 0.025       | 14.1      |

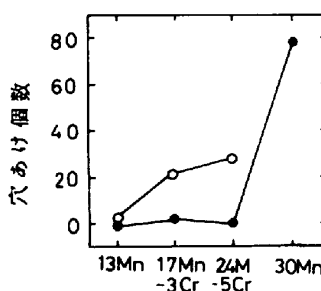


図10 ドリル穴あけ試験結果 (10φ×15mm深さめくら穴)

表3 非磁性ロール素材のSpec. (RT)

| 耐力(kg/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度(kg/mm <sup>2</sup> ) | 衝撃値(kg·m) | 透磁率   |
|-------------------------|---------------------------|-----------|-------|
| ≥ 40                    | ≥ 80                      | ≥ 15      | ≤ 1.1 |

表4 非磁性ロール素材の分析値(wt%)

| C    | Si   | Mn    | Cr   | Ni   | N      | P     | S     | Cu   | V    |
|------|------|-------|------|------|--------|-------|-------|------|------|
| 0.56 | 0.46 | 17.70 | 5.32 | 0.96 | 0.0310 | 0.017 | 0.002 | 0.02 | 0.51 |

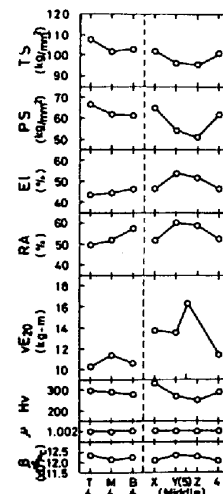


図8 H形A鋼の特性

表5 非磁性ロール素材の室温試験結果

| 試験位置            | 表層部                     | 1/4 D |       |
|-----------------|-------------------------|-------|-------|
| 引張試験<br>(JIS4号) | PS(kg/mm <sup>2</sup> ) | 46    | 43    |
|                 | TS(kg/mm <sup>2</sup> ) | 89    | 87    |
|                 | EI(%)                   | 68    | 67    |
|                 | RA(%)                   | 56    | 55    |
| 衝撃試験<br>(JIS4号) | vE20<br>(kg-m)          | 20.2  | 20.7  |
|                 | 透磁率(μ)                  | <1.01 | 1.002 |

#### 4.2 高Mn非磁性鋼の応用

高Mn非磁性鋼を高温用途に適用する初の試みとして、連続鋳造機の電磁攪拌装置付属の非磁性ロールとして使用した例について報告する。鋼の連続鋳造は製造コスト低減の中心的課題であり、この連鋳材の組織の均一化及び介在物の低減を目的として電磁攪拌装置が実用化されるに伴い、非磁性ロールが要求されるようになったものである。

耐熱用非磁鋼としては高価なNiを多量に含む材料が知られているが、安価な高Mn非磁性鋼の適用は注目すべきものである。高Mn鋼を高温用途に適用する場合(i)高温強度(ii)オーステナイト相の熱的安定性(iii)高温耐酸化性(iv)熱膨張などに注

意する必要がある。表3には非磁性ロール素材の強度，透磁率のSpec.を示す。表4にはその成分組成を示す。製造工程は次のようである：製鋼（EF-LRF（脱ガス））→分塊→大形圧延（240φ）→溶体化・水靱→材料試験→荒加工→仕上加工。この材料も圧延時の変形抵抗は大きい既存の設備で製造することができた。表5に室温での試験結果を示すが，Spec.を満足している。

このロール材成分には添加元素としてVを用いているので，析出処理により強度上昇が期待される。図11に溶体化処理後とさらに析出硬化処理後の高温引張試験結果を示す。820℃×8hの析出処理により，引張強度はあまり変化しないが耐力は700℃までの全温度域で10kg/mm<sup>2</sup>程度増加することが知見された。必要に応じてこのような強化処理を行うことにより本鋼の高温強度は使用上問題がないことが確かめられた。ただし，この組成では，表面の高温腐食について若干の問題があり現在検討を進めている。

高Mn鋼の高温での使用に関連して，代表的成分系0.5C-2.4Mn-5Cr鋼（HA），0.6C-3.0Mn（HB）に対して溶体化水靱処理後の高温引張試験結果を図12，13に示す。鋼種により若干の違いがあるが700℃～900℃付近で延性の低下を生じる温度領域が存在しているのが特徴である。

4.3 高Mn非磁性鋼の溶接継手性能など

前述の現場製造材並びに実験用鋼塊材を用いていずれも同材継手およびSM-50との異材継手性能試験を行った。母材，溶接材料，開先形状等を表6に示した。溶接後のX線割れ検査，組織観察において割れは存在せず，サイドベンド試験結果からも溶接状況は良好であることが確かめられ，同材継手ばかりでなく普通鋼との異材継手で使用することも期待できる。溶接試験についてはこの試験以外に詳しい試験が行われていることをつけ加えておく。

高Mn鋼の耐候性や耐錆性の改善も行われており，Crなどの添加元素が効果的であることが確かめられている。

5. 結言

広範囲の高Mn非磁性鋼について基本成分であるC，Mnの熱膨張や磁性並びに常温と低温の機械的特性に及ぼす効果について調べ，その役割を説明した。その結果に基づいて開発した(i)低温用鋼(ii)高強度鋼(iii)一般用鋼などについて述べるとともに，各種形状からなる製品の現場製造実験についても言及した。さらに実際応用例として，

高温用途の連铸電磁攪拌装置用非磁性ロールをとりあげた。今後も高Mn非磁性鋼を広範囲に適用することを目的として研究・開発を行う予定である。

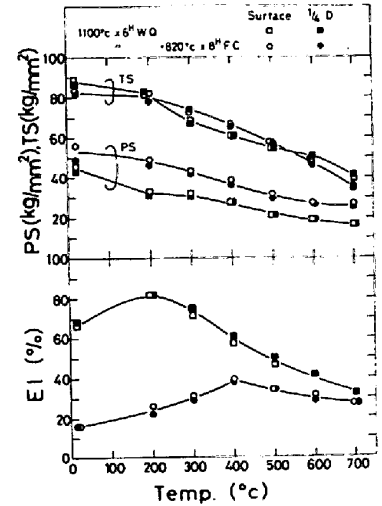


図11 非磁性ロール材の高温引張試験結果

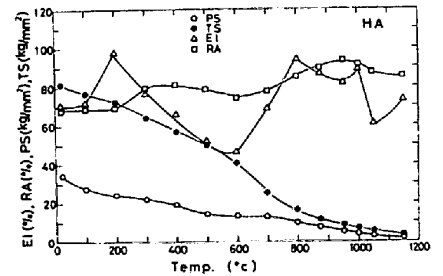


図12 HA鋼の高温引張試験結果

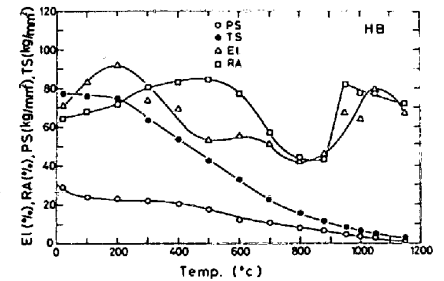


図13 HB鋼の高温引張試験結果

表6 溶接材料，溶接条件などと継手性能

| 記号         | 母材成分                       | 同材継手   |                          |                            | SM50との異材継手      |                          |                            |                 |
|------------|----------------------------|--------|--------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|
|            |                            | 透磁率    | 耐力<br>kg/mm <sup>2</sup> | 引張強度<br>kg/mm <sup>2</sup> | 吸収エネルギー<br>kg·m | 耐力<br>kg/mm <sup>2</sup> | 引張強度<br>kg/mm <sup>2</sup> | 吸収エネルギー<br>kg·m |
| HA         | 0.5C-2.4Mn-5Cr             | 1.006  | 63                       | 85                         | 13.5            | 34                       | 53                         | 14.8            |
| CC         | 0.6C-1.8Mn-5.5Cr-1Ni-0.5V  | 1.006  | 49                       | 85                         | 13.8            | 33                       | 53                         | 13.3            |
| D          | 0.15C-2.4Mn-5Cr-1.5Al-0.3V | 1.007  | 33                       | 63                         | 14.2            | 34                       | 53                         | 15.3            |
| 溶接方法       |                            | 手溶接    |                          | 開先形状<br>                   |                 |                          |                            |                 |
| 溶接材料       |                            | MC-16  |                          |                            |                 |                          |                            |                 |
| 板厚         |                            | 2.2mm  |                          |                            |                 |                          |                            |                 |
| シャルドーノッチ位置 |                            | 溶着鋼中央部 |                          |                            |                 |                          |                            |                 |