熱膨張率の小さい高 Mn オーステナイト鋼の開発

榊 本 弘 毅¹⁾ 吉 村 博 文²⁾
末 宗 賢一郎³⁾ 本 間 弘 之⁴⁾

1. 特 徴

本鋼材は、高 Mn-Cr 系鋼を基本として、液体窒素 (LN_2) および液体ヘリウム (LHe) 温度など極低温における強度、靱性などの機械的性質、熱膨張率などの物理的性質に関する基礎的研究結果に基づいて開発された極低温構造用材料である。その主たる特徴は、25%Mn-5%Cr を主成分とし、極低温において安定したオーステナイト相と高強度、高靱性を有し、また熱膨張率が従来の SUS 304 などの Ni-Cr 系ステンレス鋼に比べて約半分と小さく、非磁性を示すものである。

開発の基本となったこの基礎的研究は、著者らが世界に先がけて、いち早く着手し、極低温を対象とした今日の高 Mn 系鋼開発の端緒を成すもので、就中高 Mn 系鋼における熱膨張率の低下現象の発見とそれを利用した材料の開発は、世界的にも高く評価されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

このように、本鋼材は熱膨張率が小さいなど高性能を有することから、核磁気共鳴装置の構造材、さらにわが国の TRISTAN 計画に関する極低温積層試作装置などに使用されている⁽⁴⁾。

2. 開発の背景と狙い

昭和 30 年(1955 年)後半から今日に至るまでに、エネルギー源としてのメタン、エタン、エチレン、酸素等のガスの利用は飛躍的に増加してきた。さらに今日では、超電導現象などを利用した極低温工業の発達にともなって、ヘリウム等の利用も盛んに行なわれ、利用するガスの種類は日増しに増加し、使用温度もますます低温側へ拡大する傾向にある。このような趨勢において、これらに使用される極低温構造用材料の需要もますます増加する傾向にある。

極低温用材料としては、靱性の確保と、超電導装置のように、極低温において強力な磁界が加わるため、非磁性であることが必要なことから、結晶構造が面心立方格子(FCC)を有するものが有利である。そこで、従来 SUS 304 をはじめとするオーステナイト系ステンレス鋼、また非鉄材料としては Al-Mg 合金などが実用化されてい

る。低温用材料としては、靱性などの機械的性質の外に、熱サイクルによる材料の膨張収縮が構造物の設計上重要な要因となり、熱膨張率を考慮する必要がある。FCC 系材料はそれが一般的に大きく、また熱膨張率の小さいアンバー (Fe-36%Ni 合金) を使用する場合もあるが、コスト的に問題があり、最近より安価でかつ熱膨張率の小さい FCC 系材料の要求も強い。

そこで著者らは、低温での特性、特に強度靱性、熱膨張率に注目して、金属組織的にオーステナイト相になるように、高価な Ni の代りに安価でしかも Ni と同じオーステナイト化元素である Mn に注目して、Mn-Cr 系オーステナイト鋼開発のための基礎研究を世界に先がけて行ない、その開発に成功した。その経過は次の通りである。

開発目標特性を表 1 に示す。強度については、既存のフェライト系低温用鋼 9Ni 鋼とほぼ同等の設計応力がとれるように、室温で耐力 300 MPa 以上、また LHe 温度では 900 MPa 以上とし、しかも伸びはいずれにおいても 30% 以上とした。熱膨張率については、できるだけ小さい方が望ましいが、少なくとも一般の構造用鋼いわゆる普通鋼よりも小さいことを目標とした。しかし熱膨張率と成分に関する基礎データは当初ほとんどない状態であったので、この点については何か新しい画期的な発見にたよらざるを得なかった。このほか疲労特性、溶接性、切削性また熱伝導率の目安となる電気抵抗などは、既存の SUS 304 並もしくはそれ以上の良好な特性を有することとした。

表 1 開発目標特性。

引 張 性 質				物 理 的 性 質		
0.2% 耐力 (MPa)		伸 び (%)		熱膨張率	比透磁率	電気抵抗
室 温	LHe 温度	室 温	LHe 温度	(/ K)		他
≥ 300	≥ 900	≥ 30	≥ 30	$\leq 9 \times 10^{-6}$	≤ 1.02	SUS 304 並

3. 開 発 の 経 過

本鋼材開発の技術的ポイントはこの 3 点にある。

(1) Mn, Cr の効果と基本成分 (25Mn-5Cr) 鋼の選定

(i) Mn, Cr によるオーステナイト化

まず LN_2 温度まで安定してオーステナイト相を有する基本成分鋼を選定するために、Mn 5~35%, Cr 0~15%, Ni 0~1.0%, C 0.01~0.25% の成分範囲で供試材を作製し、 LN_2 に深冷後の組織および引張、衝撃特性を

* 新日本製鉄株式会社

1) 八幡技術研究部次長研究員 (現: 鋼管研究センター 部長研究員) 2) 光技術研究部主任研究員 3) 八幡技術研究部主任研究員 4) 溶接研究センター主任研究員

Development of a High Manganese Austenitic Steel Having Low Thermal Expansion Coefficient; H. Masumoto, H. Yoshimura, K. Suemune, H. Honma (Nippon Steel Corporation)
1986 年 1 月 31 日受理

調べた。その結果を図 1 に示す。深冷処理後でオーステナイト相を示す境界線は 15Mn-10Cr と 25Mn-0Cr の点を結ぶ線で、これ以上の Mn, Cr の成分範囲で安定したオーステナイト相を示す。強度はオーステナイト相境界線以下では非常に高い値を示し、Mn, Cr の増加にともない境界線以上になると低下してくる。オーステナイト相の安定している領域、例えば 25Mn-5Cr 鋼では C 0.05% (図中○印) から 0.15% (□印) と増加することによって、耐力は 147 MPa から 196 MPa に、また引張強さは 634 MPa から 649 MPa と C による強化がある。靱性については、さきの強度とは全く逆の傾向で、高 Mn 高 Cr になるにつれオーステナイト相の比率が増加し、靱性は向上してくる。オーステナイト相の安定している 25Mn-5Cr 鋼では、衝撃値は 98 J を示し、これに Ni1% を添加 (図中□印) すると 145 J と向上し、きわめて安定した高靱性を示してくる。

図 1 Mn-Cr 鋼の組織、強度および靱性。

(ii) Mn による熱膨張率の低下

上記成分範囲で、熱膨張率におよぼす Mn, Cr の影響を調べた結果、従来見られなかった全く新しい現象を発見した。すなわち Mn 増加によって熱膨張率が低下する現象であり、Mn 25% で熱膨張率が最小となる。その一例を図 2 に示す。これは Cr 0~15% の範囲において、ほぼ同じような傾向を示すが、Cr 5% のときがより低く、また Ni 1% の添加ではほとんど変化しない。この現象は、わが国が世界に先がけて高 Mn 系鋼の研究開発に取り組み明らかにしたもので、低熱膨張率を有するオース

図 2 Mn 系オーステナイト鋼の Mn 含有量による熱膨張率の変化 (室温~LN₂ 温度間の平均熱膨張率)。

テナイト鋼開発という点でアンバーと並んで注目すべき事項である。

(2) Nb 添加による強化

上記の安定オーステナイト鋼の強度をさらに高めるために、オーステナイト鋼における耐力と固溶強化および結晶粒径の関係を明らかにし、N, Nb の添加が有効であることを明らかにした。その結果を図 3 に示す。これより適正添加量は N, Nb 各々 0.1% 程度である。

以上 (1) (2) の結果をもとに、適正成分鋼として 0.15C-25Mn-5Cr-1Ni-0.1Nb-0.1N 系を選定した。

図 3 25Mn-5Cr-1Ni 鋼の耐力におよぼす N および Nb の添加の影響。

(3) すぐれた極低温特性

本鋼材の極低温への適用を検討するために、LHe 温度における引張特性を調べた。荷重-変位曲線を図 4 に示す。降伏後ははっきりとしたセレーションを示しながら比較的小さな勾配で加工硬化する。変形時の組織変化を透過電子顕微鏡によって観察した。その結果の一例を図 5 に示す。これより、この鋼の変形は、転位のほかに積層不整および ε 相の生成によって行われ、α' マルテンサイト変態は伴わないことがわかった。

耐力および伸びの温度依存性を図 6, 7 に示す。耐力は温度依存性が大きく、LHe 温度では目標値を十分満足し、一方伸びの低下割合も少なく、本鋼材は極低温で使用する材料としてきわめて有望であることを示している。シャルピ衝撃試験のほかに破壊靱性試験⁶⁾も行なったが、いずれも良好な結果を示した。

図 4 25Mn-5Cr-1Ni 鋼の LHe 温度における荷重-変位曲線。

図5 25Mn-5Cr-1Ni 鋼の LHe 温度における引張変形後の透過電子顕微鏡組織。

図6 25Mn-5Cr-1Ni 鋼の強度の温度依存性。

図7 25Mn-5Cr-1Ni 鋼の伸びの温度依存性。

4. 実用規模による確性

適正成分鋼について、実用規模での製造試験を行なった。その化学成分および材質特性の一例を表2, 3に示す。極低温において高耐力と、すぐれた延性、靱性を示

表2 25Mn-5Cr-1Ni 鋼の化学成分。

鋼 種	成 分 (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	N
25Mn-5Cr-1Ni 鋼	0.15	0.25	24.50	0.026	0.005	1.09	5.08	0.100	0.110

表3 25Mn-5Cr-1Ni 鋼の LHe 温度における強度と靱性。

鋼 種	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸 び (%)	シャルピー衝撃 吸収エネルギー 試験片 (J)	破壊靱性 K _{IC} (J) (MPa√m)
25Mn-5Cr-1Ni 鋼	1015	1798	31.4	50	240

☆ 5 × 10 × 55 (mm)

している。このほか溶接性、切削性、また電気抵抗なども、従来の SUS304 と全く遜色ない結果がえられている。

5. 実績と今後の期待

本鋼材は、超電導磁石などの極低温構造用材料に適用されるものである。現在核磁気共鳴装置の超電導磁石の構造材として厚板材が適用され、またわが国における TRISTAN 計画に基づく超電導磁石の構造材として、2 mm の薄板材が積層試作装置内枠に適用される。特に熱膨張率が小さいために、極低温に冷却されるときに、構造上きわめて有効に作用している。

本鋼材は、特に Mn 25% の成分において熱膨張率が小さくなることを発見し、これに基づいて開発された新機能材料である。この基礎研究結果については、国際低温材料会議(ICMC)において最優秀論文賞を受賞している⁽³⁾。今後核融合炉などの実用化に向けて、極低温でさらに巨大な磁場中で使用可能で、さらに放射線などに対しても物性的に安定した材料が必要となってくる。本鋼材は、その開発の大きな手がかりを与えると同時に、熱膨張率などの物理的性質と物理冶金の関係から、さらに新しい機能材料開発の糸口を与えるものである。

6. 特 許

- (1) 特許登録番号：745272
- (2) 特許登録番号：1076495
- (3) 特許登録番号：1095686 他

文 献

- (1) 吉村博文, 山田直臣, 矢田 浩, 本間弘之, 伊藤 悌二: 鉄と鋼, **61** (1975), 321.
- (2) J.W.Morris, Jr., S.K.Hwang, K.A.Yushchenko, V.I.Belotzerovetz and O.G.Kvasnevskii: Fe-Mn Alloys for Cryogenic Use, *Advances in Cryogenic Engineering*, Ed. by K.D.Timmerhaus, R.P.Reed and A.F.Clark, Plenum Publishing Corporation, New York, **24** (1978), p.91.
- (3) H.Yoshimura H.Masumoto and T.Inoue: Properties of Low-Carbon 25Mn-5Cr-1Ni Austenitic Steel for Cryogenic Use, *Advances in Cryogenic Engineering Materials*, Ed. by R.P. Reed and A.F.Clark, Plenum Publishing Corporation, New York, **28** (1982), p.115. [Best Paper 1981 受賞論文].
- (4) H.Yoshimura, H.Sumitomo, H.Masumoto and K.Suemura: Properties of 25Mn Austenitic Steel Sheet for Cryogenic Use, *International Cryogenic Materials Conference*, Kiev. USSR, July 24-26 (1984).
- (5) H.I.McHenry, J.W.Elmer and T.Inoue: Fracture Properties of A 25Mn Austenitic Steel and its Welds at 4 K, *Advances in Cryogenic Engineering Materials*, Ed. by K.Tachikawa and A.F.Clark, Butter Worth and Company, United Kingdom, **29** (1983), p.413.