ロケットチャンバー用 210 kgf/mm² 級超高張力鋼の開発

松崎 明博¹⁾ 佐藤 信二²⁾ 奥村 健人³⁾
正野 進¹⁾ 岡崎 洋²⁾

1. 緒 言

18%Ni マルエージング鋼はその優れた強靱性のために、高い信頼性を要求される高強度部材として、航空・宇宙産業分野を中心に広く使用されている。川崎製鉄¹⁾では1962年(昭和37年)より引張強さ170~205 kgf/mm²のマルエージング鋼材(以下、HT 200P と称す)の製造を開始しており、1966年(昭和41年)に打ち上げられた宇宙科学研究所(当時、東京大学)のL型ロケット最上段機体用材料として使用されたのを皮切りに、続いて開発されたM型ロケット用材料として使用され、今日までに10数機の科学衛星の打ち上げに役立っている⁽¹⁾。

このような科学衛星の成果をもとに、宇宙科学研究所ではハレー彗星観測のために我が国初の科学惑星探査機の打上げを計画し、それに伴いM型ロケットの一層の性能向上が必要となった。このため、M型ロケット機体を製造している三菱重工業²⁾神戸造船所では機体の薄肉設計による軽量化をさらに徹底的に追求し、ロケット打上げ能力の改善を図る方針を定めた。

薄肉化のためには鋼材の強度レベルの向上が必要である。しかし、一方では構造物の破壊に対する安全性の観点から靱性の確保も必要である。著者らは強度および靱性の向上を図るために鋼材の適正な化学成分、製造条件、ならびに溶接、加工性等を含めて検討し、HT 200P 鋼の強靱性をさらに改善したマルエージング鋼(以下 HT 210P と称す)の工業的規模での製造技術を開発し、M型ロケットへの実用化を達成した。

2. 開発経緯

(1) 適正化学成分の設定

18%Ni マルエージング鋼は Co, Mo, Ti 等の金属間化合物の時効析出により高強度化されるものであり、これら合金元素の組み合わせ増量により強度向上が可能である⁽²⁾。しかし、単に強度増加を図ったのでは、この強度水準の材料では破壊靱性値が著しく低下し、脆性破壊

の危険性や環境強度の問題がクローズアップしてくる。

そこで、強度増加を図りつつ破壊靱性を維持、向上する手段として不純物元素量に着目し、詳細調査を行なった。その結果を図1に示す。C, Si, Mn, S等の不純物元素を従来材のレベルよりもさらに低減する、すなわち鋼材を高純度化することにより、強度水準を210 kgf/mm²級にまで向上しても200 kgf/mm²級材の破壊靱性値を維持できることがわかった。この高純度化のためには後述するように新しい精錬工程を採用し、これを実現することができた。

図1 マルエージング鋼の破壊靱性におよぼす不純物元素量の影響。

(2) 熱処理による強靱化技術の確立

マルエージング鋼の溶体化処理は通常オーステナイトの再結晶温度以上で行なわれる。しかしながら図2に示すように逆変態終了温度以上で再結晶開始温度以下の未再結晶域で溶体化処理を行なうことができれば、強度および破壊靱性の向上が可能である。これは宇宙科学研究所の堀内教授らが述べているように⁽³⁾、未再結晶域では逆変態により誘起された高密度の転位が保存されているためその後の変態により生じたマルテンサイトはあたかもオースフォーム的效果を受け、さらにその下部組織が微細になるためと考えられる。しかしながら通常のマルエージング鋼ではこのような未再結晶域が非常に狭いためこれまで工業的熱処理の対象とはなり得なかった。

逆変態終了温度を上昇させずに再結晶開始温度のみを

* 川崎製鉄株式会社

1) 技術研究本部鉄鋼研究所厚板研究室主任研究員

2) 技術研究本部鉄鋼研究所厚板研究室ステンレス鋼研究室主任研究員

3) 千葉製鉄所管理部厚板鋼管管理室主査

** 三菱重工業株式会社

1) 技術本部高砂研究所溶接加工総合研究室長

2) 神戸造船所新製品技術部機械設計課主任

Development of 210kgf/mm² Grade Ultra-high Strength Steel for Rocket Motor Cases : A.Matsuzaki*, S.Sato*, T.Okumura*, S.Shono**, H.Okazaki**(*Kawasaki Steel Corporation, **Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

1986年1月31日受理

図2 未再結晶溶体化処理の模式図。

図3 再結晶開始温度におよぼすB量の影響。

図4 HT 210P 鋼の引張延性におよぼすB量の影響。

上昇させて、未再結晶域を拡大する元素としてB(硼素)が有効であることが堀内らによって指摘された⁽⁴⁾。そこで筆者らは未再結晶域溶体化の工業的適用を可能とするための適正B量について詳細検討を行なった。その結果、図3に示すようにB量が約5 ppm以上でその効果が顕著に現われることを明らかにした。

一方、図4に示すように過剰Bの添加は脆化を招来する恐れがある。脆化は溶体化時に粒界に生成する粗大硼化物が原因と考えられ^{(5)~(6)}、Bの添加にあたっては十分に留意する必要がある。

以上の知見に基づき、適正B量の添加によりマルエージング鋼の脆化を招来することなく未再結晶域溶体化処理を工業的に適用することが可能となり、本鋼種の特徴とも言える変態誘起転位を活用した強度、靱性の向上が実現できた。

このような熱処理によるマルエージング鋼の強靱化法は、冷間圧延等の他の強靱化法に比べて異方性、質量効果がなく、また厚肉材等にも適用可能であり今後さらに適用対象の拡大が期待される。

(3) 電子ビーム溶接(EBW)の適用

HT 200P 鋼材によるロケット機体の溶接組立には従来 TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接法が採用されてきた。しかし、この方法による溶接部には18%Ni マルエージング鋼の一般的傾向としてデンドライト間に γ 相が島状に残留し、このため溶接部の強度が母材に比べて低下することが知られている。この現象を回避するため、従来のアーク溶接には無い、特徴的な深い溶け込みの得られる電子ビーム溶接法の適用を試みた結果、溶接入熱の低減による残留 γ 相の減量、溶接ビード断面の狭幅化によりほぼ母材と同程度の継手強度を得ることができた。電子ビーム溶接適用の効果を図5に示す。

図5 EBW と TIG 溶接の継手効率比較。

3. HT 210P 鋼の製造工程および製品特性

HT 210P 鋼の製造工程を図6に示す。また成分の例を表1に示す。前述のように靱性確保のためには不純物元素を低減させる必要があるが、そのために川崎製鉄㈱で開発された ss-VOD 法 (strongly stirred Vacuum Oxygen Decarburization) による精錬工程を適用し、さらに VAR (Vacuum Arc Remelting) 工程と組み合わせ

図6 HT 210P 鋼の製造工程

表 1 HT 210P 鋼の成分例 (wt%) .

	Ni	Co	Mo	Ti	C	Si	Mn	S
従来鋼 (HT200P)	18.0 ~19.0	8.0 ~8.5	4.6 ~5.2	0.38 ~0.48	≤0.03	≤0.10	≤0.10	≤0.01
開発鋼 (HT210P)	17.5 ~18.5	8.3 ~9.3	4.7 ~5.5	0.40 ~0.60	≤0.005	≤0.05	≤0.07	≤0.005
成分例	18.1	8.5	5.0	0.43	0.002	0.05	0.03	0.001

図 7 開発鋼の強靱性.

	d (mm)	t (mm)	l (mm)	Hoop stress (kgf/mm²)	T.S. (EBWM) (kgf/mm²)
Small scale model	450	3.9	1940	206.9	198.0
Real scale model	1403	3.5	2989	202.9	198.0

図 8 モデルチャンバの内圧破壊試験結果.

ることにより超清浄度鋼の製造が可能となった. HT 210P 鋼の機械的性質の例を図 7 に示すが, 従来鋼に比べて強度, 靱性の両面で優れた特性を有していることが分かる.

HT 210P 鋼によるロケット機体の性能は最終的には M 型ロケットの実寸大(長手方向は短縮)モデルの内圧破壊試験により確認した. モデル形状と破壊試験結果の要約を図 8 に示す. 機体の長手溶接には三菱重工業(株)神戸造船所に設置してある世界最大の真空室を備えた電子ビーム溶接装置を駆使して施工されたものである.

破壊試験の結果は M 型ロケットの設計要求性能を満たすものであり, M 型ロケット実機適用の見通しを固めることができた.

4. 製造実績

新開発鋼材 HT 210P は, 1982 年(昭和 57 年)より製造を開始し, 宇宙科学研究所の新大型ロケット M-3SII 型の機体材料として採用された. M-3SII 型 1 号機は 1985 年(昭和 60 年) 1 月我が国初の科学惑星探査機「さきがけ」の打上げに成功し, つづいて 8 月にはハレー彗星探査機「すいせい」を搭載した M-3SII 型 2 号機が打上げに成功し, その使命を無事達成することができた.

HT 210P 鋼はその優れた特性を活かし, 上述した宇宙開発分野からさらに多方面の産業分野への実用化が期待される.

5. 特 許

特開昭 60-154886 ほか 4 件申請中

文 献

- (1) 佐藤信二, 小野 寛, 大橋延夫: 川崎製鉄技報, **4**(1972), 60.
- (2) D.Mori, R.Horiuchi, T.Shimoyama, K.Kanbe, N.Ohashi, K.Inomata, A.Matsuzaki and S. Sato: *Proceedings of the 13th Int. Symp. on Space Technology and Science*, AGNE Publishing Incorporation, (1982), p.361.
- (3) 堀内 良, 栗林一彦: 鉄と鋼に投稿予定.
- (4) 栗林一彦, 堀内 良: 日本金属学会講演概要, (1985・4 月), p.209.
- (5) 松崎明博, 野原清彦, 谷川 治: 鉄と鋼, **70**(1984). No.13, S1281.