低温型 LPG 船用 TMCP 型高靱性新低温用鋼板 の諸特性とその評価

正員 矢島 浩* 正員 多田 益男*
正員 阪井 大輔** 片上 幹史***
正員 土師 利昭**** 正員 石川 忠****
正員 勝田 順一*****

Study on Characteristics of Newly Developed TMCP High-Toughness, Low-Temperature Steel Plate for LPG Carrier Application

by Hiroshi Yajima, *Member*, Masuo Tada, *Member*
Daisuke Sakai, *Member*, Mikifumi Katakami
Toshiaki Haze, *Member*, Tadashi Ishikawa, *Member*
Junichi Katsuta, *Member*

Summary

A new TMCP-manufactured high-toughness, low-temperature steel plate was developed for use in fabricating the cargo tank and hull structure of LPG carriers, which could offer both "the adequate performance in arresting the brittle unstable crack propagation in base metal" and "adequate toughness at the fusion line of welded joints produced by high-heat-input welding process."

This report reviews the concept followed in developing the high-toughness, low-temperature steel plate and the results of evaluation made of: (1) base metal crack propagation arrest performance, (2) fracture toughness at the fusion line of welded joint produced by high-heat-input welding process, (3) weldability, (4) cold-workability, and (5) line-heating workability.

The above studies showed that the newly developed steel plate could ensure adequate safety and reliability for use in cargo tanks and hull structure of LPG carriers loaded with the cryogenic cargo, with a high level of crack propagation-arrest capability, excellent high-heat-input weldability, and shop workability.

1. 緒 言

TMCP(Thermo Mechanical Control Process)による鋼板製造技術の急速な進歩と相俟って、TMCP によって製造された鋼板の使用実績も急速に伸びている。

低温用鋼板も、従来の焼ならし処理材や焼入れ・焼戻し処理材から、TMCP 鋼板への移行が徐々に実現している現状である^{1)~5)}。

本報は、低温型 LPG 船のタンク・船殻用材としての使用

を目的に、最近の TMCP 技術を駆使して開発・実用化した降伏点 33 kgf/mm² 級の高靱性新低温用鋼板(日本海事協会(NK)規格:KL 33)について述べるものである。

本報で述べる高靱性新低温用鋼板は、危険物運搬船である低温型 LPG 船の安全性・信頼性を確保するため、母材の十分な破壊靱性は勿論のこと、脆性不安定亀裂に対する十分なアレスト性能と、大入熱溶接継手部の十分な破壊靱性との両性能を兼ね備えることを目標に開発され、実用化されたものである。

本報では、この高靱性新低温用鋼板の開発思想・方針や、諸強度特性・溶接性・加工性およびそれらの評価について述べる。

* 三菱重工業(株)技術本部 長崎研究所

** 三菱重工業(株)長崎造船所

*** 新日本製鐵(株)技術本部 市場開発技術部

**** 新日本製鐵(株)中央研究本部 大分技術研究室

***** 長崎大学 工学部

2. 新低温用鋼板の開発思想・方針

2.1 大入熱溶接継手靱性向上策の基本的な考え方

大入熱溶接継手 Fusion Line(F.L.)・熱影響(HAZ)部の靱性は、母材の化学成分によって決定されると言っても過言ではない。また、大入熱溶接継手 F.L.部の靱性を確保するためには、粗大なフェライト サイド プレート(の生成を抑制することが重要である。この粗大フェライト サイド プレート(の生成を抑制する手段として、微量 Ti, B の添加によるオーステナイト粒内変態促進効果を活用した F.L.・HAZ 靱性向上技術⁶⁾を適用し、化学成分設計を行なった。

一方、母材の破壊靱性確保には、未再結晶領域を拡大させる Nb の添加が有効であり、TMCP によって製造される鋼板には Nb の添加が広く実用されている。しかし、大入熱溶接継手部の靱性は、一般に Nb の添加によって劣化する傾向があるので、大入熱溶接継手部の靱性を安定的に確保するためには、Nb の添加は好ましいとは言えない。

以上により、開発鋼板においては、大入熱溶接継手部の靱性を安定確保するために、化学成分としては Nb を添加しない Ti-B 系とした⁷⁾。開発鋼板の化学成分の例を Table 1 に示す。

2.2 アレスト性能向上策の基本的な考え方

母材の脆性不安定亀裂に対するアレスト性能を向上させる手段としては、Nb の添加による組織の細粒化や、Ni の添加によるマトリックスの靱化が有効であることは一般によく知られているが、大入熱溶接継手部の靱性を確保しつつ優れた母材アレスト性能を有する鋼板を開発するために、これらの元素の添加によらないアレスト性能向上策を検討した。

アレスト性能を支配するメカニズムの概要を Fig.1 に示す。一般に、脆性不安定亀裂の伝播抵抗として、

- ①破面単位のリッジで生じる塑性変形
- ②表層部で生じるシア リップ(塑性変形)

Table 1 Chemical compositions of developed steel plate(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	B	Ceq. ⁽¹⁾	P _{CM} ⁽²⁾
0.06	0.25	1.38	0.004	0.002	0.043	0.007	0.0009	0.29	0.14

(1) $C_{eq.} = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$

(2) $P_{CM} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + B$

Fig.1 Controlling factors of brittle unstable crack arrest fracture toughness

- ③マイクロ セパレーションによる3軸応力度の低減
- ④マイクロ クラックによる亀裂先端での応力状態緩和⁸⁾

- ⑤斜行破面による亀裂伝播経路の増大

などが影響するものと考えられる。本開発鋼板では、上記①の効果を最大限に活用すべく、有効結晶粒径(破面単位)を微細化させる圧延方法を検討した。

破面単位は、結晶方位の同一なコロニー サイズにより決定される⁹⁾が、Fig.2に示すようにフェライト粒径とアレスト性能($K_{ca} = 400 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ を示す温度: $T_{Kca} = 400$)との間には相関関係が認められ、フェライト粒径の微細化がアレスト性能の向上に寄与していることがわかる。すなわち、本開発鋼板の成分系(Table 1 参照)の特徴である低 C, Nb 無添加故に生じる圧延で導入された転位の著しい回復・再結晶現象によるフェライト粒径粗大化の防止が、開発鋼板におけるアレスト性能向上のポイントとなる。そこで、 Ar_3 直上温度での大圧下圧延を適用した特殊圧延法により、フェライト粒径の微細化を達成し、かつ隣接するフェライト粒の結晶方位の一致による破面単位の粗大化を防止した高アレスト性能鋼板製造技術を確立した。

開発鋼板の母材組織を Fig.3 に示す。なお、Fig.3 には、比較のため、同一化学成分の通常圧延鋼板の組織も示した。

Fig.2 Relation between brittle unstable crack arrestability and diameter of ferrite grain

Fig.3 Microstructure of developed steel plate, compared with ordinary steel plate

開発鋼板のフェライト粒が微細になっていることがわかる。

3. 新低温用鋼板の諸特性とその評価

3.1 母材の破壊靱性・アレスト性能とその評価

開発・実用化した高靱性新低温用鋼板の代表例として、板厚 8, 10, 16 mm の開発鋼板を供試して、破壊靱性とアレスト性能を把握・確認した。Table 2 に供試した開発鋼板の機械的性質の例を示す。当然のことながら NK KL 33 鋼板の規格値を充分満足している。

供試鋼板の中央切欠(0.1 mm 幅の機械切欠)付広幅(試験片幅: 400 mm)引張試験結果による破壊靱性(Kc)値と温度との関係を Fig.4 に示す。低温型 LPG 船のタンク・船

Table 2 Example of mechanical properties of developed steel plates used

Plate Thick. (mm)	Tensile Tests ⁽¹⁾			Impact Tests ⁽²⁾	
	Y.P. (kgf/mm ²)	T.S. (kgf/mm ²)	El. (%)	vE-51°C (kgf·m)	vTrs (°C)
8	37	46	26	14.6	<-110
10	36	46	29	20.4	<-110
16	37	46	30	34.7	-93

(1) NK U1 Type Specimen, T-Direction

(2) NK U4 Type Specimen, L-Direction

Plate Thick. 8mm: 5×10×55(mm) Size Specimen
10mm: 7.5×10×55(mm) Size Specimen
16mm: 10×10×55(mm) Size Specimen

Fig. 4 Relation between Kc and temperature (Base plate. Results of center-0.1mm machine-notched wide plate tensile tests)

殻用材(使用温度: -46°C程度)としては、非常に優れた破壊靱性を有しているといえる。また、板厚 16 mm の鋼板では、L・T 方向での破壊靱性値にほとんど差がなく、優れた性能を有しているといえよう。

さらに供試鋼板の、亀裂伝播部幅 500 mm の試験片による標準温度勾配型二重引張試験結果による脆性不安定亀裂伝播・停止靱性(Kca)値と温度との関係を、Fig.5 に示す。低温型 LPG 船のタンク・船殻用材の使用温度、すなわち -46°C程度で、Kca 値は 400 kgf√mm/mm² 以上を満足している。

脆性不安定亀裂伝播・停止挙動に関する静的取扱いはあるが、軟鋼板や HT 50 鋼板程度の強さの鋼板を対象にした場合、亀裂伝播部幅 400~500 mm 程度の標準試験片によって求めた脆性不安定亀裂伝播・停止靱性(Kca)値が、実船殻の使用温度で、

$$Kca \geq 400 \sim 600 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$$

を満足していれば、当該鋼板を使用したクラックアレスターは有効であると考えてもよいようであり^{(10)~(12)}、実船殻での脆性不安定破壊事故例の逆解析結果^{(10),(11)}や、SR 193 研究部会共同研究での大型試験片による脆性不安定亀裂伝播・停止試験結果⁽¹²⁾などにより裏付けられている。

以上により、供試鋼板すなわち開発・実用化した高靱性新低温用鋼板は、低温型 LPG 船のタンク・船殻用材として、脆性不安定亀裂に対する充分なアレスト性能を有していると判断できる。

3.2 大入熱溶接継手の破壊靱性とその評価

上述の供試鋼板に、造船現場で使用している代表的な大入熱溶接法を適用して溶接した継手を供試した。適用した

Fig. 5 Relation between Kca and temperature (Base plate. Results of double tension tests)

溶接条件を Table 3 に示す。

供試継手から採取した V-ノッチシャルピー衝撃試験結果の、 -51°C (使用温度 $(-46^{\circ}\text{C}) - 5^{\circ}\text{C}$) における吸収エネルギー ($vE_{-51^{\circ}\text{C}}$) を、Fig.6 に示す。Fig.6 には、NK KL 33 鋼板溶接継手 (試験片 3 本の平均値) に対する規格値も示した。同図から明らかなように、供試継手では、規格値を充分満足している。

さらに、供試継手 F.L.部の中央切欠 (0.1 mm 幅の機械切欠) 付広幅引張試験結果による破壊靱性 (Kc) 値と温度との関係を、Fig.7 に示す。Fig.7 中には、板厚 16 mm の KL 33 鋼板溶接継手 (L 方向) の V-ノッチシャルピー吸収エネルギーに対する NK 規格値 ($vE_{-51^{\circ}\text{C}} \geq 4.2 \text{ kgf}\cdot\text{m}$) と等価な破壊靱性値を算出して示してある。なお、等価な破壊靱性値の算出には、著者らが導出した、V-ノッチシャルピー衝撃試験結果と中央切欠付広幅引張試験結果との相関式¹³⁾を用いた。

Fig.7 から明らかなように、供試継手 F.L.部の Kc 値は、NK 規格要求靱性値を余裕をもって十分に満足している。

以上により、供試継手すなわち開発・実用化した高靱性新低温用鋼板の大入熱溶接継手 F.L.部は、低温型 LPG 船のタンク・船殻用材として、充分な破壊靱性を有していると判断できる。

3.3 溶接性・冷間加工性・線状加熱加工性とその評価

上述の板厚 16 mm の供試鋼板を用いた最高硬さ試験結果の $H_{V\max}$ とビード長との関係を、Fig.8 に示す。

Fig.8 から明らかなように、HAZ 最高硬さは非常に低い。日本鋼船工作法精度標準 (JSQS)¹⁴⁾ による仮付け溶接などのビード長規制基準、すなわち許容限界硬さ 400 Hv から

Plate Thick. (mm)	Welding Method	Direction	Symbol	NK Requirement (kgf·m)	Specimen (mm)
8	FB	T	△	≥ 1.9	① 5x10x55
10	SEG ARC	L	◇	≥ 3.5	② 7.5x10x55
16	FAB	T	□	≥ 2.8	③ 10x10x55
	SEG ARC	L	○	≥ 4.2

Fig.6 Relation between absorbed energy at -51°C ($vE_{-51^{\circ}\text{C}}$) and notch location (Welded joint. Results of V-notched Charpy impact tests)

判断すれば、供試鋼板では、ビード長 10 mm の施工も充分可能であることになる。

以上のように、供試鋼板は HAZ 硬化性が非常に低いことから、耐溶接割れ性も優れていると考えられ、外気温度を 0°C と想定した場合の予熱無し施工も充分可能であると推測される¹⁵⁾。

また、板厚 16 mm の供試鋼板を用いて、冷間加工性を調査した。

一般に、冷間加工性を調査する手法として、引張りひずみを付与した後、時効処理 (250°C 加熱 1 時間保持) を行なった“ひずみ時効材”についての、V-ノッチシャルピー衝撃試験が行なわれる。

供試鋼板の 5% ひずみ時効材に対する V-ノッチシャルピー衝撃試験結果の $vTrs$ (50% 脆性破面率遷移温度) と、母材 (As Received 材) の $vTrs$ を対比して、Fig.9 に示す。

Table 3 Welding conditions

Plate Thick. (mm)	Welding Method	Groove Shape	Heat Input (Average) (kJ/cm)
8	FB		21
10	SEG ARC		63
16	FAB		86
	SEG ARC		89

FB: Flux Backing Submerged Arc Welding

FAB: Flux Asbestos Backing Submerged Arc Welding

SEG ARC: Simplified Electrogas Arc Welding

Fig. 7 Relation between K_c and temperature (F.L. of welded joint. Results of center-0.1mm machine-notched wide plate tensile tests)

Fig. 8 Relation between H_{vmax} and welded bead length (Results of maximum hardness tests)

Fig.9 から明らかなように、供試鋼板では5%ひずみ時効による靱性劣化は極くわずかであり、従来の低温用鋼板や船体用 HT 50 鋼板での靱性劣化範囲が、 $vTrs$ で最大 30°C 程度⁴⁾⁽¹⁶⁾ であることと比べれば、供試鋼板の冷間加工性は非常に優れているといえる。

さらに、低温用鋼板に対して線状加熱加工を施すことのは是非についてはともかくとして、板厚 8, 16 mm の供試鋼板を用いて、線状加熱加工性を調査した。供試鋼板に対す

Fig. 9 Comparison of $vTrs$ of 5% strain aged plate with that of as-received plate

る線状加熱加工条件としては、JSQS¹⁴⁾ による TMCP 型船体用 HT 50 鋼板 E 級鋼(EH 32, EH 36)に対する加工条件、すなわち、

- ・900°C加熱直後水冷の2回繰返し
- ・900°C加熱後空冷の2回繰返し

を適用した。線状加熱は、供試鋼板圧延方向に行なった。強度・靱性試験には、線状加熱部分を溶接継手に想定して採取した引張試験片(NK U 2 A 号試験片)と、加熱表層部(表面下 1 mm)から採取した V-ノッチシャルピー衝撃試験片を供試した。

線状加熱加工後の強度・靱性変化を、Fig.10 に示す。Fig. 10 から明らかなように、線状加熱加工後も KL 33 鋼板母材に対する NK 規格値を充分満足しており、強度・靱性変化も実用上問題ない範囲内であり、供試鋼板への線状加熱加工の適用も充分可能である。

以上により、供試鋼板すなわち開発・実用化した高靱性新低温用鋼板は、低温型 LPG 船のタンク・船殻用材として、造船現場での諸施工に対して、充分な溶接性・冷間加工性・線状加熱加工性を有していると判断できる。

Fig. 10 Mechanical properties of after line-heated plate (T-direction)

4. ま と め

危険物運搬船である低温型 LPG 船のタンク・船殻用材 (使用温度: -46°C 程度) としての使用を目的に,

- ・母材の脆性不安定亀裂に対する充分なアレスト性能と,
- ・大入熱溶接継手 (F.L.) 部の充分な破壊靱性

との両性能を兼ね備えた, 降伏点 33 kgf/mm^2 級の高靱性新低温用鋼板 (NK 規格: KL 33) を, 最近の TMCP 技術を駆使して開発・実用化した。

開発・実用化した高靱性新低温用鋼板の開発思想・方針や, 諸強度特性・溶接性・加工性およびそれらの評価について述べた。概略は以下の通りである。

- (1) 化学成分系は, Nb を添加しない Ti-B 系とし, Ar₃ 直上温度での大圧下圧延を適用した特殊圧延法により製造した。
- (2) 使用温度における母材の Kca 値は $400 \text{ kgf} \cdot \sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ 以上を満足しており, 充分なアレスト性能を有している。
- (3) 大入熱溶接継手 F.L. 部の使用温度における Kc 値は, NK 規格要求靱性値を余裕をもって十分に満足している。
- (4) 溶接性, 冷間加工性, 線状加熱加工性等, 造船現場での通常の諸施工に対して非常に優れた性能を有している。

参 考 文 献

- 1) 山形俊介, 出口明雄, 矢島 浩, 多田益男, 今井純一郎: 新制御圧延型低温用アルミキルド鋼板の LPG タンクへの適用に関する評価, 日本造船学会論文集, 第 152 号 (昭 58.1)
- 2) 矢島 浩, 多田益男, 出口明雄, 仁藤 弘, 今井純一郎: 新制御圧延 (TMCP) 型低温用鋼板の破壊靱性とその評価, 西部造船会会報, 第 67 号 (昭 59.3)
- 3) 矢島 浩, 多田益男, 梶本勝也, 縄田卓生, 野田俊介: 寒冷海域海洋構造物用高張力鋼の大入熱溶接継手特性とその評価, 西部造船会会報, 第 72 号 (昭 61.8)
- 4) 矢島 浩, 多田益男, 梶本勝也, 森田鴻司, 縄田卓生, 野田俊介: 寒冷海域海洋構造物用高張力鋼の大入熱溶接継手特性とその評価 (その 2), 西部造船会会報, 第 73 号 (昭 62.3)
- 5) 矢島 浩, 多田益男, 梶本勝也, 川村昭宣, 野田俊介, 縄田卓生: TMCP (新制御圧延) 型高張力鋼板の船舶・海洋構造物への有効利用, 三菱重工技報, Vol. 23 No. 4 (昭 61.7)
- 6) 大野恭秀, 岡村義弘, 内野耕一, 山本広一, 松田昭一, 池田賢郎, 佐藤健夫: Ti-B 系大入熱溶接低温用鋼の開発, 製鉄研究, 第 326 号 (昭 62), p.45
- 7) 石川 忠, 大下 滋, 今野敬治, 多田益男, 矢島浩, 阪井大輔: 高アレスト型大入熱溶接用 LPG 船用鋼の開発 — 鋼板のアレスト性能の検討 第 3 報 —, 鉄と鋼, CAMP-ISIJ, Vol. 3 (平 2), p.887
- 8) 石川 忠, 土師利昭, 間瀬秀里, 大下 滋: マイクロ・クラック・タフニングによるアレスト性能の向上 — 鋼板のアレスト性能の検討 第 2 報 —, 鉄と鋼, CAMP-ISIJ, Vol. 2, (平 1), p.1885
- 9) 石川 忠, 土師利昭: Kca 値を支配する有効結晶粒径とフェライト粒径の関係 — 鋼板のアレスト性能の検討 第 1 報 —, 鉄と鋼, CAMP-ISIJ, Vol. 2 (平 1), p.731
- 10) 矢島 浩, 川野 始: 船舶の脆性亀裂事故の解析例, 日本造船学会溶接研究委員会第一分科会資料 1-550-82 (昭 57.5)
- 11) 永元隆一, 牛島正夫, 川村昭宣, 矢島 浩, 多田益男: 新制御圧延型 50 キロ級高張力鋼板の破壊靱性とその評価, 日本造船学会論文集, 第 152 号 (昭 58.1)
- 12) 日本造船研究協会第 193 研究部会: 新製造法による 50 キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究総合報告書, 日本造船研究協会報告第 100 号 (昭 60.5)
- 13) 矢島 浩, 多田益男, 野田俊介, 北田博重, 池上潔, 高橋直樹: 船体用鋼板の破壊靱性値推定手法に関する一考察, 西部造船会会報, 第 75 号 (昭 63.3)
- 14) 鋼船工作法研究委員会第一分科会: 鋼船工作法精度標準 JSQS (1985)
- 15) 真谷捷郎, 多田益男, 川崎哲郎, 矢島 浩, 野田俊介, 中島正樹: TMCP 型低温用鋼板の現場工作に関する一考察, 西部造船会会報, 第 80 号 (平 2.8)
- 16) 日本圧力容器研究会議 (JPVRC) 材料部会圧力容器用鋼材専門委員会: 調査報告 CR 鋼板のタンク, 圧力容器への適用について — CR 鋼板の性能と施工に際し検討を要する課題 — (昭 56.4)