
LPG 貯蔵タンク用低温用アルミキルド厚鋼板

Al-Killed Steel Plates of Low Temperature Service for LPG Storage Tanks

木中 良次 (Ryoji Kinaka) 奥村 健人 (Taketo Okumura) 寺嶋 久栄 (Hisae Terashima) 皆川 章 (Sho Minagawa) 中野 善文 (Yoshifumi Nakano) 松本 重人 (Shigeto Matsumoto)

要旨：

LPG タンク用鋼材として連続鋳造製 38 mm 厚の SLA 37 厚鋼板を製造し、その鋼板特性を調査した。制御圧延(KTR)および制御圧延制御冷却(MACS)鋼の脆性亀裂停止特性 Kca は -50°C で $600 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 以上を示した。焼入れ焼戻し(QT)鋼の立向 MIG, TIG, SMAW および横向 SAW, 並びに QT, KTR および MACS 鋼の $65\sim 115 \text{ kJ/cm}$ の大入熱溶接 EGW の継手ボンド部特性は、 $vE\text{-}50^{\circ}\text{C}$ で $7 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上、 -50°C の COD 値 0.3 mm 以上および Kca で $470 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 以上と良好であった。以上より、LPG タンク用鋼板に適する連続鋳造製 SLA 37 厚鋼板を OT, KTR および MACS 法により製造することが可能であることを確認した。

Synopsis：

Investigation has been made on the properties of continuously cast 38 mm thick SLA37 steel plates for LPG storage tanks. The crack arrest toughness KCA of the steel plates manufactured by Kawasaki Thermomechanical Rolling (KTR) and Multipurpose Accelerated Cooling System (MACS) processes was higher than $600 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ at -50°C . In vertical MIG, TIG, SAW, and horizontal SAW of steel plates manufactured by the quenching and tempering (QT) process, and in EGW with a high weld heat input of $65\sim 115 \text{ KJ/cm}$ of QT, KTR, and MACS steel plates, bond properties measured at the fusion line of welded joints are $7 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ and over in $vE\text{-}50^{\circ}\text{C}$, 0.3 mm and over in -50°C COD value, and $470 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ in Kca. The foregoing results proved the technical feasibility of the production of SLA37 steel plate for LPG storage tanks by using the combination of continuous casting and QT, KTR and MACS processes.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Al-Killed Steel Plates of Low Temperature Service
for LPG Storage Tanks

木中 良次
Ryoji Kinaka
千葉製鉄所 管理部厚
板・鋼管管理室 主査
(掛長)



奥村 健人
Taketo Okumura
本社 鉄鋼技術本部鋼
材技術部 主査(課長)



寺嶋 久栄
Hisae Terashima
鉄鋼研究所 厚板研究
部厚板研究室 主任研
究員(課長)・工博



皆川 章
Sho Minagawa
鉄鋼研究所 厚板研究
部溶接研究室



中野 善文
Yoshifumi Nakano
鉄鋼研究所 水島研究
部第2研究室 主任研
究員(課長)・Ph. D.



松本 重人
Shigeto Matsumoto
鉄鋼研究所 厚板研究
部厚板研究室 主任研
究員(掛長)

1 緒 言

近年の液化ガスの利用増大にともない、LPG、LNG などの備蓄増強計画が進められている。現在 LPG の大量備蓄用には低温および常圧の二重殻円筒貯槽による貯蔵方式が採用されており、その容量は4万tが限界となっている。このことは、貯槽本体に用いられる鋼板が JIS G3126 に規定されている低温压力容器用炭素鋼の SLA33B (降伏点 33 kgf/mm², QT 処理) 鋼が主として使用されたことから、応力除去を必要としない最大厚さ 38 mm を超えないような設計を行っていることから来ている。限られた敷地内での貯蔵効率を高めるためには、1基当たりの貯蔵能力のアップをはかる必要があり、強度的に1ランク上の SLA 37 鋼材の適用により容量5万5千t貯槽を実現することが課題となっている。

従来 LPG 低温タンクの現場溶接には主として被覆アーク溶接およびサブマージアーク溶接が採用されてきた。しかし、タンクの大

要旨

LPG タンク用鋼材として連続鋳造製 38 mm 厚の SLA 37 厚鋼板を製造し、その鋼板特性を調査した。制御圧延 (KTR) および制御圧延制御冷却 (MACS) 鋼の脆性亀裂停止特性 K_{ca} は -50°C で $600 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 以上を示した。焼入れ焼戻し (QT) 鋼の立向 MIG, TIG, SMAW および横向 SAW, ならびに QT, KTR および MACS 鋼の $65\sim115 \text{ kJ/cm}$ の大入熱溶接 EGW の継手ボンド部特性は、 $\sqrt{E_{-50^{\circ}\text{C}}}$ で $7 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上、 -50°C の COD 値で 0.3 mm 以上および K_{ca} で $470 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 以上と良好であった。以上より、LPG タンク用鋼板に適する連続鋳造製 SLA 37 厚鋼板を QT, KTR および MACS 法により製造することが可能であることを確認した。

Synopsis:

Investigation has been made on the properties of continuously cast 38 mm thick SLA37 steel plates for LPG storage tanks. The crack arrest toughness K_{ca} of the steel plates manufactured by Kawasaki Thermomechanical Rolling (KTR) and Multipurpose Accelerated Cooling System (MACS) processes was higher than $600 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ at -50°C . In vertical MIG, TIG, SAW, and horizontal SAW of steel plates manufactured by the quenching and tempering (QT) process, and in EGW with a high weld heat input of $65\sim115 \text{ kJ/cm}$ of QT, KTR, and MACS steel plates, bond properties measured at the fusion line of welded joints are $7 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ and over in $\sqrt{E_{-50^{\circ}\text{C}}}$, 0.3 mm and over in -50°C COD value, and $470 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ in K_{ca} . The foregoing results proved the technical feasibility of the production of SLA37 steel plate for LPG storage tanks by using the combination of continuous casting and QT, KTR and MACS processes.

および高能率化が急務となり、従来の溶接法の見直しを含め、エレクトロガスアーク溶接をはじめとする各種溶接工法の確立が必須課題となってきた。

ところで、最近の製鋼および厚板製造技術の進歩は著しく、製鋼工程における高潔浄化および連続鋳造化とともに、厚板製造工程においては、従来の焼入れ焼戻しによる製造法 (以下 QT 法という) のほかに新たに制御圧延 (以下 KTR 法という) および制御圧延制御冷却 (以下 MACS 法という) による製造方法が開発され、現在実用化されている。

このような背景から、連続鋳造製 SLA 37 鋼 (板厚 38 mm) の開発を目的として、下記の研究対象についての一連の試験を実施した。

- (1) 従来の QT 鋼の立向および横向溶接への各種自動溶接法の適用の検討。
- (2) KTR および MACS 鋼の基本性能、破壊特性、溶接継手性

* 昭和61年9月9日原稿受付

能および加工性能の確認。

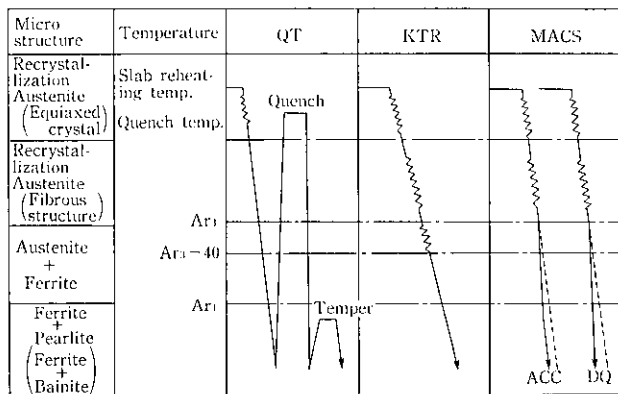
(3) 大入熱溶接における QT, KTR および MACS 鋼の溶接継手性能の確認。

本報告ではこれらの概要について述べる。

2 供試鋼板の設計の考え方

2.1 低温用アルミキルド厚鋼板の製造方法

製鋼および厚板製造技術の進歩にともない、低温用アルミキルド鋼の製造方法も従来の造塊法から連続鋳造法、QT 法から KTR および MACS 法へとかわりつつあり、また、JIS への規格化も進められている。厚板製造における新製造法と従来法を模式的に Fig. 1 に示すが、当社においては、各製造プロセスにより製造される鋼板の特長を最大限に引き出す製造条件を確立している。



QT: Quench temper
KTR: Kawasaki thermomechanical rolling
MACS: Multipurpose accelerated cooling system
ACC: Accelerated (Controlled) Cooling
DQ: Direct Quenching

Fig. 1 Schematic diagram of manufacturing process of SLA 37

2.2 低温用アルミキルド鋼の大入熱溶接対策

LPG 貯蔵用 SLA 37 鋼の成分系は、Si-Mn 鋼を基本成分に各種合金元素を母材および溶接継手部の低温靱性の向上のために添加した低 C の成分系となっている。なかでも低温靱性の優れている成分系には、Cu-V-Ni 系と Nb 系の 2 成分系がある。それぞれの成分系の特徴を Table 1 に示す。低 C 系の採用により、母材の低温靱性と同時に溶接部の靱性を向上させることができる。しかし、大入熱溶接継手部は、粗粒化して靱性劣化を生じるので、その靱性を -45°C 以下で確保するにはこれだけでは不十分である。その対策として、REM, Ti などの添加による微細析出物を利用した HAZ の結晶粒微細化が有効と考えられる。

さらに、MACS 鋼においては、大入熱特性の向上を期待し、低 Si 化をはかった。溶接継手部靱性におよぼす Si の影響の一例を Fig. 2 に示すように、0.1~0.13 wt% 程度で Si 量が溶接継手部の靱性に対して最適となっている。ただし、JIS に規定されている SLA 37 鋼の Si 量は、0.15~0.55 wt% であり実際には 0.16~0.18 wt% の範囲を目標とした。また、溶接継手部の靱性におよぼす Nb の影響は Fig. 3 に示すように、0.025 wt% 以上の Nb 添加で靱性が劣化し、0.020 wt% 以下の Nb 添加が良好といえる。

Table 1 Characteristics of chemical composition

Process	Type of chemical composition	Purpose of alloying elements	Characteristic
QT	Low C-Cu-V-Ni	- Cu, V and Ni additions contribute to raising the strength. - Ni addition improves low temperature toughness.	The carbon equivalent is slightly high value because of Cu, V and Ni additions, but the low temperature toughness is superior.
KTR		REM and Ti additions prevent the toughness deterioration of the high heat input weld joint.	
MACS	Low C-Nb	- Nb addition contributes to raising the strength. - The effect of refining the grain size by Nb addition improves the low temperature toughness. - REM and Ti additions and the reduced Si content prevent the toughness deterioration of the high heat input weld joint.	The carbon equivalent is low because of raising the strength through the Nb addition only, and the weld ability is superior.

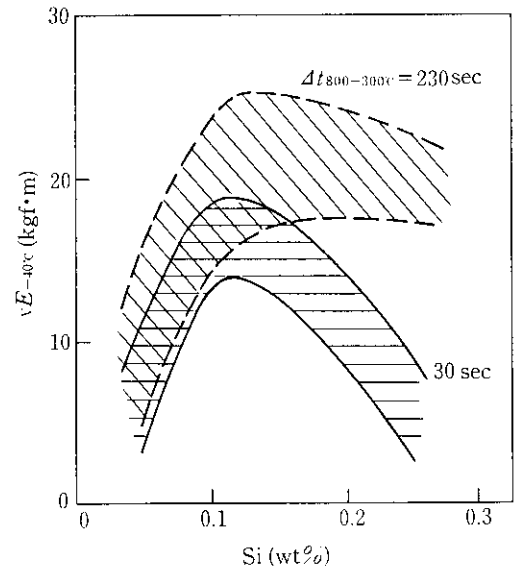


Fig. 2 Effect of Si content on absorbed energy at -40°C of synthetic heat affected zone of 0.09%C-1.4%Mn-Ti-REM steel

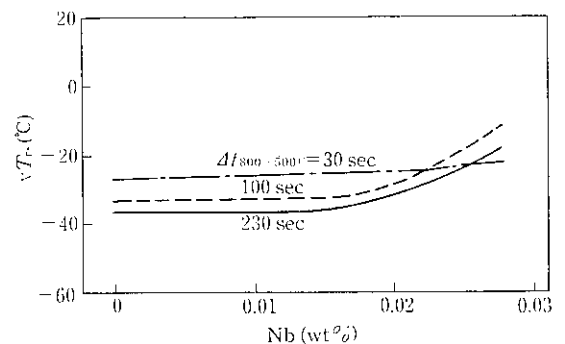


Fig. 3 Effect of Nb content on V notch charpy fracture appearance transition temperature of synthetic heat affected zone of 0.07%C-1.5%Mn-Ti-REM steel

Table 2 Chemical compositions of materials

(%)														
Process	Sample	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	V	Nb	Al	Ti	REM	N
QT	Ladle	0.08	0.22	1.54	0.005	0.004	0.16	0.22	0.026		0.037	0.008	0.006	0.0036
	Product	0.08	0.22	1.54	0.006	0.004	0.17	0.22	0.026		0.038	0.007	0.006	0.0040
KTR	Ladle	0.08	0.30	1.57	0.006	0.003	0.20	0.40	0.040		0.034	0.008	0.006	0.0041
	Product	0.08	0.29	1.56	0.006	0.004	0.18	0.41	0.040		0.037	0.007	0.006	0.0048
MACS	Ladle	0.06	0.16	1.47	0.008	0.002				0.012	0.019	0.007	0.006	0.0035
	Product	0.07	0.17	1.45	0.008	0.002				0.014	0.022	0.007	0.004	0.0036
Specification of SLA 37		≤0.18	0.15 1 0.55	0.80 1 1.60	≤0.035	≤0.035								

$$* C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

このような基本的な成分設計の思想に基づき工場試作した供試鋼板の化学組成を Table 2 に示す。製造工程は、150 t LD 転炉→RH 真空脱ガス処理→連続鋳造→厚板圧延・熱処理とした。

3 母材特性

3.1 基本性能

供試鋼板の引張、曲げおよび V ノッチシャルピー衝撃試験結果をまとめて Table 3 に示す。いずれの鋼板においても引張強度は $YS \geq 37 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $TS \geq 50 \text{ kgf/mm}^2$ の JIS 規格値を満足している。また、曲げ試験結果はすべて良好であった。V ノッチシャルピー衝撃試験結果は各供試鋼板とも -60°C で $20 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上であり、 vT_{IK} および vT_{IS} とも -90°C 以下と良好な値であった。また、従来の結果と同様に QT 鋼では吸収エネルギー値が高く異方性も認められない。それに対して KTR 鋼では L, C 方向間で異方性が認められる。また、MACS 鋼については、QT 鋼と KTR 鋼の中間的な特徴を有しているが、この特徴は厚板圧延条件により異なるものと考えられる。

3.2 破壊特性

COD 試験をはじめとする各種母材の破壊試験結果を Table 4 に示す。COD 試験は BS 5762²⁾ に準拠して行い、切欠は板厚貫通切欠とし切欠先端には疲労き裂を導入した。

COD 値の評価には、WES 3003 の低温用圧延鋼板判定基準³⁾に示されている評価法を用いると、鋼板に要求される靱性値 δ_c は、 $\sigma = \sigma_{y0}/2$ 、鋼板の保証降伏点 $\sigma_{y0} = 37 \text{ kgf/mm}^2$ およびヤング率 $E = 21\,000 \text{ kgf/mm}^2$ より

$$\delta_c = \frac{3.85\sigma_{y0}}{E} \times \frac{1\,100}{\sigma_{y0}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\therefore \delta_c = 0.20$$

Table 4 に示すように -50°C における δ_c はすべて 1.2 mm 以上であり、いずれの鋼板もきわめて高い靱性を有することを示している。

ディープノッチ試験は、切欠の全長 160 mm 、先端半径 0.1 mm の試験片を用いて行った。ディープノッチ試験による破壊靱性値 K_{IC} は次式を用いて計算した。

$$K_{IC} = \sigma_g \sqrt{W \tan(\pi c/W)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで

σ_g : 脆性破壊発生時あるいは最大荷重時の応力

W : 試験片幅

$2c$: 切欠全長

Table 3 Mechanical properties of base metal

Process	Thick- ness	Direc- tion	Tensile test			Bend test 180° R=1.5 t	V notch charpy test (1/4 t)		
			YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)		vE_{-50} (kgf·m)	vT_{IK} (°C)	vT_{IS} (°C)
QT	38	L	44.7	53.2	39	Good	31.1	<-120	<-120
		C	44.3	52.7	39	Good	28.3	<-120	<-120
KTR	38	L	41.0	50.8	37	Good	26.6	-112	<-120
		C	42.5	52.3	36	Good	21.7	-105	<-120
MACS	38	L	44.3	51.5	35	Good	27.6	-121	<-120
		C	45.0	51.7	34	Good	22.2	-92	-98
Specification of SLA 37			≥37	50~60	≥20	1.5 t	—	≤-55	—

Table 4 Fracture toughness of base metal*

Steel	Three point bending COD test**	Deep notch test		ESSO test		Double tensile test	
	δ_c (mm)	σ_{net} (kgf/mm ²)	K_{IC} (kgf/mm ^{3/2})	K_{ICa} (kgf/mm ^{3/2})	Classification** (°C)	K_{ICa} (kgf/mm ^{3/2})	Classification*** (°C)
QT	>1.70 >1.73	58.6	634.2	190	-31 -111	210	-35 -67
KTR	>1.75 >1.79	53.8	550.5	600	-75 -105	700	-94 -138
MACS	1.51 1.41	56.7	580.2	660	-84 -116	700	-74 -103

* Tested at -50°C

** BS 5762

*** WES 3003

ディープノッチ試験結果より破壊応力 σ_{net} は公称応力を十分上まわっており良好な成績が得られた。さらに、供試鋼板の脆性き裂伝播停止特性を調査するため温度勾配型の ESSO および二重引張試験を実施した。脆性き裂伝播停止位置の温度における応力拡大係数 (脆性き裂伝播停止靱性値 K_{ICa}) は次式を用いて計算した。その結果を従来の結果と比較したのが Fig. 4 であり、良い一致がみられる。

$$K_{ICa} = \sigma \sqrt{2W \tan(\pi c_a/2W)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで

σ : 負荷応力

c_a : 停止き裂長さ

W : 試験片幅

脆性き裂の停止特性は、ESSO および二重引張試験結果より、KTR 鋼 $\geq$ MACS 鋼 $>$ QT 鋼の順となっており、KTR および MACS 鋼では QT 鋼より脆性き裂伝播停止特性が向上することを示している。

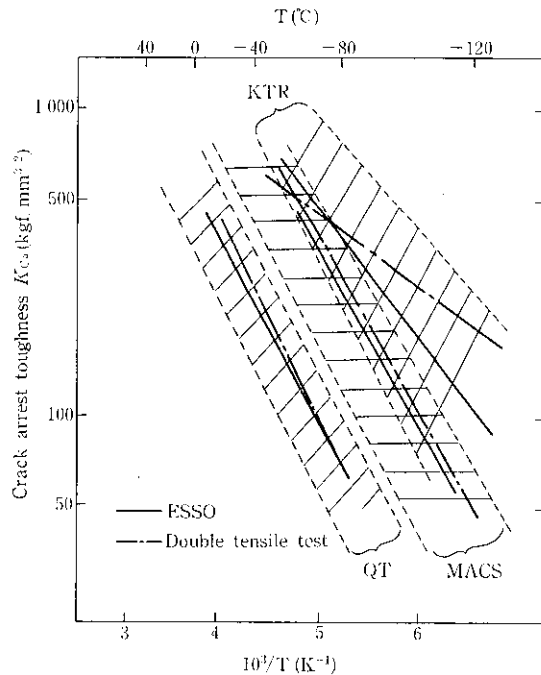


Fig. 4 Relation between crack arrest toughness K_{Ca} and test temperature

3.3 疲労特性

供試鋼板の疲労特性を調査するため疲労き裂伝播速度および下限値 (ΔK_{th}) を求めた。測定結果を Table 5 に示すが、供試鋼間には有意差は認められなかった。なお、 ΔK の計算には下式を用いた (ASTM E647-83⁹⁾ に準拠)。

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \times \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{1.5}} \cdot (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (4)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

ここで、

ΔK : 応力拡大係数の範囲

ΔP : 荷重範囲

B : 試験片厚

W : 試験片幅

a : き裂長さ

N : くり返し数

C, m : 材料定数

α : a/W

また、QT 鋼と MACS 鋼については ΔK_{th} を求めたが、それぞれ、19 kgf/mm^{3/2} および 16 kgf/mm^{3/2} であった。

Table 5 The value of m and C obtained in fatigue crack propagation tests

Steel	Material constants	
	m	C
QT	3.20	5.71×10^{-11}
KTR	3.06	1.04×10^{-10}
MACS	3.36	3.35×10^{-11}

4 溶接継手性能

4.1 溶接条件

溶接継手性能の調査に用いた供試材の溶接条件を Table 6 に示す。また、鋼板のロール方向は実施工に倣い、SAW については溶接線方向、MIG, TIG, EGW および SMAW に対しては溶接線と直角方向とした。

4.2 溶接継手部の基本性能

溶接継手の引張、曲げおよび V ノッチシャルピー衝撃試験結果を Table 7 にまとめて示す。各継手引張強さはすべて母材規格 (JIS G3126 SLA37) を十分満足している。曲げ結果もすべて良好な結果となった。また、各継手の -50°C の吸収エネルギーはすべて 5.0 kgf·m 以上と良好な値となっている。大入熱溶接の一種である EGW 継手部の -50°C における吸収エネルギーは各供試鋼板の溶接金属、ボンド部および HAZ 部とも Backing side で 10 kgf·m 以上、Finishing side で 7.0 kgf·m 以上、 vT_{rs} についてもすべて -50°C 以下と良好であった。

4.3 溶接継手部の破壊特性

各溶接継手 -50°C におけるボンド部、HAZ 部および溶接金属 (EGW) の COD 試験結果、ならびにボンド部のディープノッチおよび ESO 試験結果を Table 8 に示す。各溶接継手の COD 値 δ_c はいずれも 0.2 mm 以上であり、ボンド部の δ_c は 0.3 mm 以上、HAZ 部の δ_c は 1.0 mm 以上と良好であった。

ボンド部のディープノッチ試験結果より、真の破断応力はいずれも公称応力を十分上まわるものであった。また周応力が作用する縦継手である EGW 継手ボンドの破壊靱性値 K_{IC} は 436 kgf/mm^{3/2} 以上の値を示した。

KTR 鋼, MACS 鋼の EGW 継手ボンド部および QT 鋼の横方向 SAW 継手ボンド部について行った ESO 試験結果は、Table 8 に示したように、A 種温度で -66°C 以下と母材相当以上の結果を示した。また、溶接継手ボンド部にき裂を伝播させようとしたがいずれの場合もき裂は、ボンド部にそって伝播せず母材にそって停止した。き裂がボンド部を直進しないで母材にそれることは、き裂の応力拡大係数が小さい段階で母材に入ることより、き裂の伝播停止の観点からすると好ましいものである。き裂がボンドにそって伝播しないことの主因として溶接残留応力が考えられる。

次に LPG 貯槽を製作した場合の脆性き裂の発生について以下に検討する。貯槽における最大応力は円周応力として生じ、高さ方向の応力はその 1/2 程度と考えられるので、高さ方向の溶接継手について考える。EGW 継手を考えたとき、LPG 温度より幾分低い -50°C における COD の最低値は溶接金属において得られたが、その値は 0.2 mm であった。ボンドにおける COD の値の最低値は 0.3 mm 以上あったが、ここでは溶接金属の最低の COD 値 0.2 mm を用いて考察する。

貯槽の溶接継手としては、脆性破壊の観点から最も厳しい板厚 38 mm をとり、角変形として 15 mm/1000 mm、目違い量として 5 mm を仮定する。このような角変形、目違い量は、実施工技術を考えれば十分安全側の想定である。

COD を用いた脆性破壊発生に対する欠陥の評価方法としては、日本溶接協会 WES 2805¹⁰⁾ の方法を用いる。

想定欠陥に作用する歪 e は、次式で与えられる。

Table 6 Welding conditions

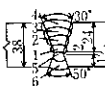
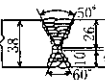
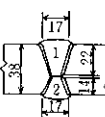
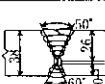
Welding method	Steel	Welding material	Side	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Shape of groove	
MIG	QT	KM-3N 1.2 mm ϕ	Back	126~131	21.0~22.0	5.9~5.2	26.8~33.0		
			Finish	122~123	21.5~22.0	6.5~5.4	24.4~30.0		
TIG	QT	KT-50 1.2 mm ϕ	Back	290~288	10.0~10.5	5.5~4.9	31.3~37.0		
			Finish	300~280	10.0~10.5	5.5~4.9	32.8~35.9		
EGW	QT	EG-51S 1.6 mm ϕ	Back	380	40	8.5	107.3		
	KTR		Finish	380	40	13.2	69.1		
	MACS								
SAW	QT	KW-50C KF-400H	Back	480	26.0	40.0	18.7		
			Finish	480	26.0	40.0	18.7		
SMAW	QT	KS-81LT 4.0 mm ϕ	Back	160	25.0	7.2	33.3		
			Finish	148	24.0	6.3	33.6		

Table 7 Mechanical properties of welded joints

Welding method	Process	Tensile test*			Bend test		V notch charpy toughness												
		TS (kgf/mm ²)	El (%)	Fracture location	Side bend	Surface bend		Charpy absorbed energy (kgf.m)*						vT_{25}					
						El (%)	Result	Backing side			Finishing side			Backing side			Finishing side		
								WM	Bond	HAZ	WM	Bond	HAZ	WM	Bond	HAZ	WM	Bond	HAZ
MIG	QT	54.7	21.5	WM	Good	38.1	Good	10.1 (47)	10.7 (4)	26.1 (3)	13.8 (32)	13.7 (38)	28.0 (9)	-52	-55	-80	-56	-56	<-80
TIG	QT	56.1	17.3	WM	Good	40.4	Good	28.5 (7)	23.4 (22)	28.5 (3)	21.8 (22)	24.5 (12)	26.8 (3)	<-80	<-80	<-80	<-80	-57	<-80
EGW	QT	57.1	44.7	HAZ-BM	Good	26.2	Good	13.2 (28)	18.5 (28)	23.8 (8)	15.3 (20)	10.0 (47)	20.9 (20)	-62	-60	<-80	<-80	-52	-76
	KTR	57.0	40.7	HAZ-BM	Good	18.7	Good	12.2 (30)	11.8 (38)	18.6 (28)	15.0 (15)	7.3 (43)	12.7 (45)	-70	-57	-73	-75	-55	-57
	MACS	54.3	43.0	HAZ-BM	Good	17.5	Good	11.6 (25)	18.8 (27)	28.7 (0)	15.2 (10)	26.0 (13)	28.8 (0)	-74	-58	<-80	<-80	-68	<-80
SAW	QT	56.6	45.5	HAZ-BM	Good	21.5	Good	5.4 (50)	15.0 (28)	24.6 (0)	6.4 (47)	17.9 (18)	25.3 (0)	-50	-65	<-80	-55	-57	<-80
SMAW	QT	57.5	48.9	HAZ-BM	Good	18.1	Good	14.8 (28)	21.5 (3)	27.3 (0)	18.4 (17)	21.7 (17)	27.3 (3)	-62	<-80	<-80	-80	-75	<-80

* Mean value of 2 test pieces

** Mean value of 3 test pieces, Test temperature -50°C , () Crystallinity percentage

Table 8 Fracture toughness of welded joints*

Welding method	Process	Three point bending COD test			Deep notch test (Bond)		ESSO test (Bond)		
		δ_C (mm)			σ_{net} (kgf/mm ²)	K_{Ic} (kgf/mm ^{3/2})	$K_{Ic,a}$ (kgf/mm ^{3/2})	Classification	
		WM	Bond	HAZ				T (°C)	T (°C)
MIG	QT	0.651	>1.856		60.2	601.9			
TIG	QT	0.508	>1.882		59.1	591.0			
EGW	QT	0.201	0.335	>1.843	51.4	525.5			
FGW	KTR	0.412	0.504	>1.676	47.8	489.1	500	<-100	<-100
EGW	MACS	0.204	1.253	>1.824	42.6	435.6	480	-72	-116
SAW	QT		1.171	>1.899	47.9	489.7	470	-66	-104
SMAW	QT		>1.890	>1.330					

* Test temperature, -50°C

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

e_1 は境界力による歪であるが、ここでは仕様応力として 14 kgf/mm^2 を仮定すると、 $e_1 = 6.67 \times 10^{-4}$ となる。

e_2 は溶接残留応力による歪であり、降伏歪 e_y の 0.6 倍で与えられ $e_2 = 1.06 \times 10^{-3}$ となる。

e_3 は継手形状による歪であるが、角変形、目違い量を上記のように設定すると、 $e_3 = 1.05 \times 10^{-3}$ となる。以上より歪 $e = 2.28 \times 10^{-3}$ が得られる。

COD 値 $\hat{o}$ と歪 e は欠陥特性寸法 $\hat{a}$ と次の関係があるとされている。

$$\delta = 3.5e\bar{a}$$

したがって、COD として 0.2 mm を仮定すると $2a=50\text{ mm}$ が求まる。この板厚貫通欠陥を破壊力学的に等価な表面欠陥に換算すると、深さ $b=0.15t=5.7\text{ mm}$ とした時の表面欠陥長さ $2a$ は無限大となり、このような大きな欠陥は非破壊検査で容易に検出できる欠陥であり、本実験における供試材を用いて製作される LPG 貯蔵タンクは十分な安全性を有するものであることが期待できる。

4.4 溶接継手部の疲労き裂伝播性能

Fig. 5 に一例として QT 38 mm 鋼の EGW 継手部における疲労伝播速度 da/dN (mm/cycle) と応力拡大係数 ΔK ($\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$) の関係を示す。溶接金属、ボンド部および HAZ 部における両者の関係は、母材の関係を示す範囲内に存在した。他の鋼材および溶接継手についても同様の結果が得られた。Table 9 に各種溶接方法で製

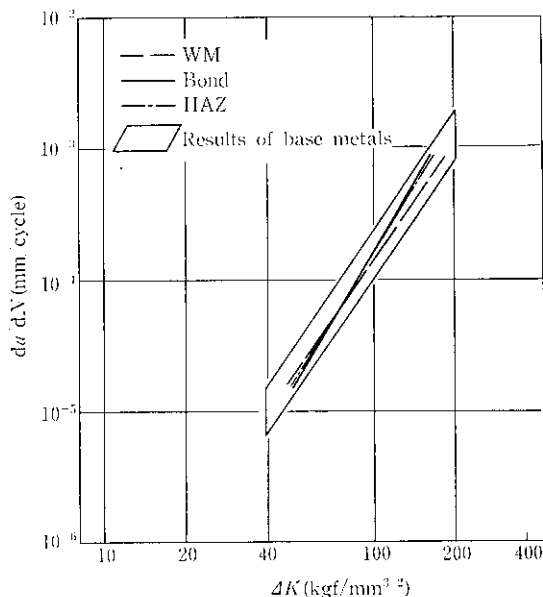


Fig. 5 Relationship between fatigue crack propagation rate da/dN and the range of stress intensity factor ΔK at EGW high heat input welding joints of steel plates produced by QT process

Table 9 The values of m and C obtained in fatigue crack propagation tests

Welding method	Process	Notch location	Material constants	
			m	C
MIG	QT	WM	2.79	4.01×10^{-10}
		Bond	3.07	1.19×10^{-10}
		HAZ	3.23	5.89×10^{-11}
TIG	QT	WM	3.48	2.01×10^{-11}
		Bond	3.37	3.15×10^{-11}
		HAZ	3.37	3.31×10^{-11}
EGW	QT	WM	2.98	1.60×10^{-10}
		Bond	3.45	2.23×10^{-11}
		HAZ	3.53	1.50×10^{-11}
EGW	KTR	WM	2.96	2.43×10^{-10}
		Bond	3.04	1.81×10^{-10}
		HAZ	3.44	2.38×10^{-11}
EGW	MACS	WM	3.27	4.83×10^{-11}
		Bond	3.44	2.43×10^{-11}
		HAZ	3.10	1.28×10^{-10}
SAW	QT	WM	3.41	3.33×10^{-11}
		Bond	2.91	2.48×10^{-10}
		HAZ	3.30	4.15×10^{-11}

造した鋼材の疲労き裂伝播試験で得られた材料定数 C および m の値をまとめて示す。疲労き裂伝播速度 da/dN (mm/cycle) と応力拡大係数範囲 ΔK ($\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$) の間の関係として、本供試材の平均として求められている $da/dN = 1.4 \times 10^{-10} (\Delta K)^{3.08}$ を用いると、板厚貫通き裂が存在し、1日に2回内容物の完全な出し入れを行うとすると10年で29000回程度の応力振幅があるので、初期き裂として全長34mmの亀裂の存在が許容できることになる。これを現実の場合の存在形態である表面欠陥に置き換えると、深さ10mm、長さ110mm程度のきわめて大きなものとなる。この結果においても供試材の安全性が確認された。

5 結 言

大型 LPG 貯蔵タンク用鋼板として、大入熱特性を具備する連続鋳造製 38 mm 厚の SLA 37 厚鋼板を製造し、その母材および溶接継手部特性を調査した。その結果、次のことがわかった。

- (1) QT, KTR および MACS 鋼の母材靱性は良好で、吸収エネルギーは C 方向 -60°C ですべて $20 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上、COD 値は C 方向 -50°C ですべて 1.4 mm 以上であった。特に KTR および MACS 鋼の脆性き裂伝播停止特性は、ESSO および二重引張試験による K_{ca} (-50°C , C 方向) で $600 \text{ kgf}/\text{mm}^{3/2}$ 以上を示し、LPG 貯蔵タンク用鋼板の要求仕様を十分満足している。
- (2) QT 鋼の立向 MIG, TIG, SMAW および横向 SAW の継手部特性は、ボンドおよび HAZ 部において $\sqrt{E_{-50^\circ\text{C}}}$ ですべて $10 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上、 -50°C の COD 値ですべて 0.5 mm 以上と良好で LPG 貯蔵タンクの施工法として可能である。
- (3) 大入熱溶接 (EGW, 入熱量 $65 \sim 115 \text{ kJ}/\text{cm}$) における QT, KTR および MACS 鋼の継手性能は、 -50°C のボンド部において $\sqrt{E_{-50^\circ\text{C}}}$ で $7 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上、COD 値で 0.3 mm 以上および ESSO 試験の K_{ca} で $480 \text{ kgf}/\text{mm}^{3/2}$ 以上と良好で、LPG 貯蔵タンクの側板立向溶接に EGW 溶接が可能といえる。

以上のことから、将来考えられる LPG 貯蔵タンクの各種溶接法に適する連続鋳造製の QT, KTR および MACS 鋼の製造が可能であることが確認された。

6 謝 辞

本報告は、奥村敏恵東京大学名誉教授（現東京電気大学教授）のもとに行った川崎重工業株式会社と川崎製鉄との共同研究の一部である。

本研究実施にあたり、長年にわたり終始ご懇篤なご指導をいただいた奥村教授ならびに本研究の遂行において多大なるご協力かつ貴重な助言をいただいた川崎重工業株式会社藤城教能氏、田中正明氏、黒瀬義幸氏に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 天野虔一, 志賀千晃, 田中智夫: 「低温仕様構造物への TMCP 鋼の適用」, 日本溶接協会船舶・鉄鋼海洋構造物部会 (1983), 私伝
- 2) British Standards Institution: BS 5762. (1979)
- 3) 日本溶接協会規格: 「低温用圧延鋼板判定基準」, WES 3003, (1983)
- 4) American Society for Testing and Materials: E 647, (1983)
- 5) 日本溶接協会規格: 「溶接継手のぜい性破壊発生に対する欠陥の評価方法」, WES 2805, (1980)