
低温用アルミキルド鋼の高効率溶接法

High Efficiency Submerged-Arc Welding of Low Carbon Al-Killed Steels for Low Temperature Services

赤秀 公造(Kozo Akahide) 浮辺 輝男(Teruo Ukibe) 阿草 一男(Kazuo Agusa) 坪井 潤一郎(Jun-ichiro Tsuboi)

要旨：

低温用タンク材として低炭素、細粒アルミキルド鋼が用いられている。この種の鋼板の溶接には、熱影響部の脆化を防止するために小入熱で多層サブマージアーク溶接する方法がとられており、きわめて非能率的である。そこで能率向上のために多電極とした深溶込みサブマージアーク溶接法の適用を検討した。新しく開発したLH法（片面1層溶接法）およびKX法（両面各1層溶接法）は高能率であり、溶接金属および熱影響部の靱性にもすぐれている。LH法は使用温度が -35°C までの低炭素アルミキルド鋼の溶接に適用できる。KX法は使用温度が -45°C となるLPGタンクの溶接にも適用できる。

Synopsis：

In welding low carbon fine-grained Al-killed steel plates used for tank vessels for low temperature services, the conventional method uses a multi-pass submerged-arc welding with small heat input to prevent possible embrittlement in the heat-affected zone (HAZ). This small heat input, on the other hand, results in low efficiency of welding. As a countermeasure to this demerit, the feasibility of a deep penetration welding has been examined using a multi-wire submerged-arc system. Newly developed processes of one-sided welding (LH process) and both-sided two-pass welding (KX process) show significantly high efficiency compared with the conventional multi-pass process, with satisfactory notch toughness in the weld metal and the HAZ. The LH process can be applied to low carbon Al-killed steel structures for service temperature as low as -35°C , and the KX process even to the LPG tank vessels for use at -45°C .

(c)JFE Steel Corporation, 2003

低温用アルミキルド鋼の高能率溶接法

High Efficiency Submerged-Arc Welding of Low Carbon Al-Killed
Steels for Low Temperature Services

赤 秀 公 造*

Kozo Akahide

浮 辺 輝 男**

Teruo Ukibe

阿 草 一 男*

Kazuo Agusa

坪 井 潤一郎***

Jun-ichiro Tsuboi

Synopsis:

In welding low carbon fine-grained Al-killed steel plates used for tank vessels for low temperature services, the conventional method uses a multi-pass submerged-arc welding with small heat input to prevent possible embrittlement in the heat-affected zone (HAZ). This small heat input, on the other hand, results in low efficiency of welding. As a countermeasure to this demerit, the feasibility of a deep penetration welding has been examined using a multi-wire submerged-arc system.

Newly developed processes of one-sided welding (LH process) and both-sided two-pass welding (KX process) show significantly high efficiency compared with the conventional multi-pass process, with satisfactory notch toughness in the weld metal and the HAZ. The LH process can be applied to low carbon Al-killed steel structures for service temperature as low as -35°C , and the KX process even to the LPG tank vessels for use at -45°C .

1. はじめに

大型オイルタンカーの減少とは対照的に LPG、LNG 船の建造が最近目立っている。これは造船の大型化から高級化への移行の一つの現れでもあり、これに対処するには、これまでの高能率な建造技術をより高品質なものに高めることが必要になっている。

LPG 船および LNG 船では、外殻はオイルタンカーなどと同等の品質設計で十分であるが、タンクおよびそれに近接する周辺部材には低温での靱性が要求される。したがって、LNG 船のタンク本体にはアルミ合金もしくは 9% Ni 鋼、LPG 船のタンクとその周辺部材および LNG 船のタンク周辺部材には低温用低炭素アルミキルド鋼が使用される。この低温用アルミキルド鋼の溶接は、熱影響部の劣化を防止する必要から、通常入熱量を著しく少なくした条件で多層盛施工¹⁾されており、非

• 技術研究所溶接研究室主任研究員
*** 技術研究所溶接研究室室長・工博
〔昭和52年6月29日原稿受付〕

** 技術研究所溶接研究室

能率的である。

筆者らは、サブマージアーク溶接の能率を向上させ、かつ所要入熱量を低減させる方法として KX 法²⁾(両面各 1 層溶接)、LH 法³⁾(片面 1 層溶接)を以前に開発し、おもに厚鋼板の溶接に適用した。高能率、高品質を特長とするこれらの溶接法を低温用アルミキルド鋼に応用することを検討した結果、この種の船の建造に適用される規格のうちもっとも厳しいとされている U.S.C.G. (United States Coast Guard) 規格をも満足し得ることが明らかになったので以下に報告する。

2. KX 法および LH 法

2-1 KX 法の概要

KX 法は、多電極サブマージアークの先行電極(以下 L 極と記す)の溶接条件をうもれアークになる大電流、低電圧、高速度にして深溶込みを確保し、後行電極(以下 T 極と記す)の電流値と極間距離を適正に選定して深溶込みビード特有の欠陥を防止し、その結果ルート面の幅をきわめて大きくした開先に小入熱、深溶込み溶接を可能とした厚鋼板の両面各 1 層溶接法である。

サブマージアーク溶接で従来大電流、高電流密度のアークが実用されなかったのは、ビード中央部の高温割れ、スラグ巻込み、ビード形状不良などの欠陥が発生するためである。KX 法では、極間距離を L 極溶融池長さの約 1/2 とし、T 極のホット・トップ作用を効果的に利用して高温割れの発生を防止するとともに溶融スラグの浮上を促進し、さらにフラックス組成を検討してビード外観ならびに継手性能を向上させた。

KX 法で溶接したビード形状の例を **Photo. 1** に示す。

Fig. 1 は KX 法および LH 法(後述)の所要入熱量を従来技術と比較した図である。KX 法では開先形状に特徴があり、ルート面の幅が板厚の半分以上にもなり、開先断面積がたとえば板厚 40mm では従来法の 1/3 以下に減少する。したがって、**Fig. 1** に示したように KX 法での所要入熱を著しく低下させることができ、その傾向は板厚が大きいほど顕著になる。これは従来技術が開先内への

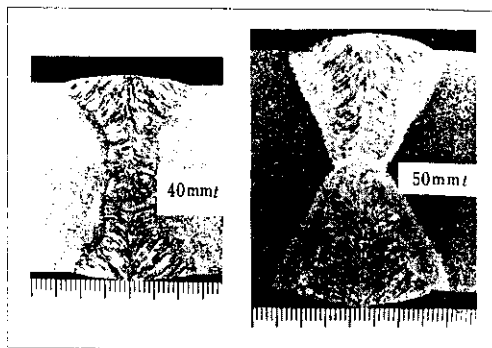


Photo. 1 Cross section of weld by KX process

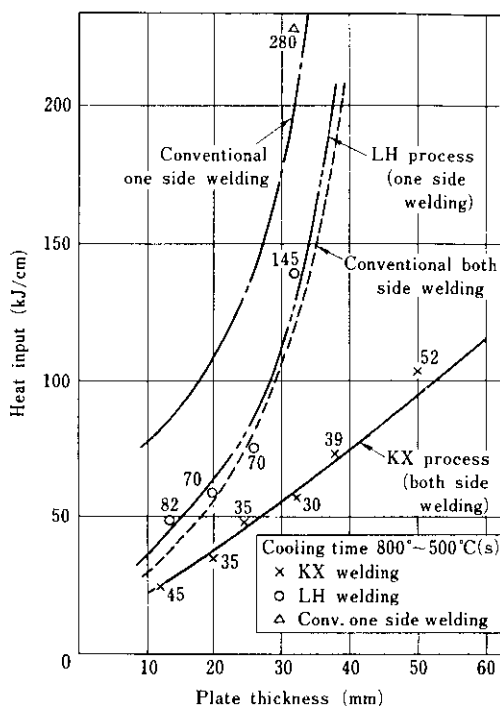


Fig. 1 Comparison of heat input required for different welding processes

肉盛溶接であり、板厚が増すと 2 次曲線的に開先断面積が急増するのに対し、KX 法ではアークの深溶込み作用を有効に利用していることから、板厚に比例してルート面の幅が増加し、板厚に対する開先断面積の増加率が小さいためである。

また、KX 法の入熱を板厚 1mm あたりに換算すると板厚に関係なくほぼ一定値になる。したがって、KX 法では **Fig. 1** に示したように 800°C から 500°C までの冷却時間(以下 $CT_{800-500}$ と記す)が薄板から厚板まで同一になり、溶接金属および

熱影響部の特性を制御しやすい。なお、この溶接法での $CT_{800-500}=30\sim40s$ は HT-80 鋼での制限入熱量 $45kJ/cm$ の場合の値にほぼ相当し、KX 法が高張力鋼の溶接にも適用し得ることがわかる。

KX 法の特長をまとめると次のとおりである。

- (1) 2電極で板厚 60mm までの両面各 1 層盛溶接が可能である。
- (2) 所要入熱が小さく、高張力鋼、低温用鋼など HAZ 靱性の要求される鋼材の溶接に適している。
- (3) 開先断面積が小さいから所要溶接材料が少なく、しかも高速で溶接できる。

2・2 LH 法の概要

LH 法は、KX 法の技術を大入熱溶接条件となる片面溶接に応用したものであり、両者の基本的特性は同じである。LH 法によるビード形状の代表例を Photo. 2 に示す。

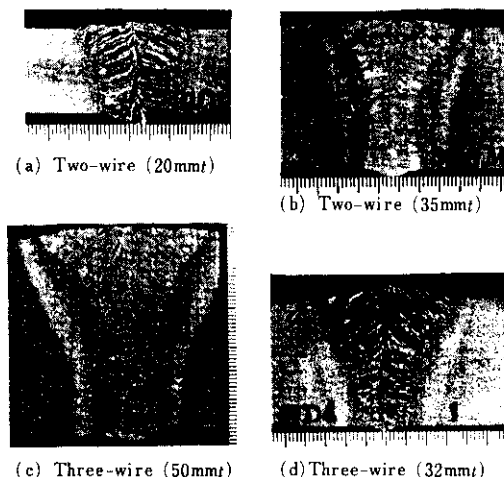


Photo. 2 Cross section of weld by LH process

この溶接では、KX 法と同様に開先のルート面の幅を板厚の $1/2$ にまで大きくしたが、L 極の大電流条件により適正な溶込みを得ることができる。Fig. 1 に示したように、LH 法での所要入熱は一般的な両面各 1 層盛溶接のときの 1 層の入熱量とほぼ同じであり、また一般的な片面溶接法でのその $50\sim70\%$ に低減している。この溶接法の $CT_{800-500}$ は従来法の $1/2$ 以下に低下しており、とくに 80s 程度となる板厚 25mm 以下の場合には、低温靱性にすぐれた HAZ 特性を備えた溶接法と

して期待できる。

本溶接方法のおもな特長をまとめると次のとおりである。

- (1) 所要入熱量を従来法に対し $30\sim50\%$ 程度減少でき、高い品質を保証できる。
- (2) 溶接速度を従来法よりも $40\sim60\%$ 程度向上できる。
- (3) 開先断面積が狭く、所要溶接材料を節減できる。
- (4) 3電極にすれば板厚 50mm まで 1 パスで溶接が可能である。

2・3 溶接法の基本特性

KX, LH 溶接法の溶接機構上の特徴は、L 極のうもれアークと T 極のホット・トップ作用にある。ここではこの二つの特性について述べる。

2・3・1 うもれアーク

CO_2 ガスシールドアークのうもれ現象⁴⁾はよく知られているが、サブマージアーク溶接においてもうもれアークが生成し、その場合均一、良好なビードが得られることを以前に推定した⁵⁾。このアーク形態にすれば、これまで利用し得なかった大電流条件もホット・トップ作用との組合せで実用可能となる。Photo. 3 はルート高さ 16mm の Y 開先に 1900A, 32V, 60cm/min の条件で深溶込み溶接を行ったときのビード断面形状である。このような条件でのアークは電子ビームに似た線熱源的性質をもっており、X 線透視装置を用いた観察から Fig. 2 に模式的に示すように、母板中に



Photo. 3 Cross section of weld under high current, low voltage, and high speed

うもれ、溶接進行方向に面状に発生しているものと推測できる。

このようなアークを利用すれば、熱源が板厚方向に分布しているため幅の狭い長方形の溶込み形状となり、ルート面の幅の大きな開先においても十分な溶込みを確保できる。すなわち、この場合小入熱で深さ方向に効果的に母板を溶かすことができ、うもれアークが溶込みの増加と所要入熱量の減少に有効に作用している。

うもれアークが生成する溶接条件範囲を 4.8mm 径のワイヤを用い、平板溶接で調べた結果を Fig. 3 に示す。うもれアークの条件を近似的に溶込み深さ P に対するビード幅 W の比が 1 以下になる範囲で代表させた。少なくともこのよ

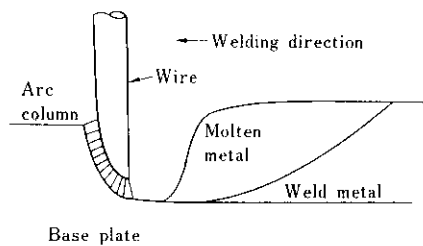


Fig. 2 Schematic diagram of buried arc

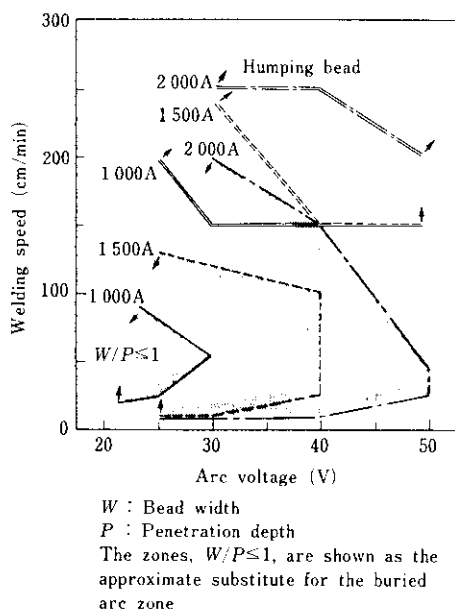


Fig. 3 Relation between bead characteristics and welding parameters

うなビード形状となる溶接条件では、X線透視装置を用いた観察結果から、アークは母板中にうもれていると推定できる。

$W/P \leq 1$ の範囲は、大電流、低電圧ほど高速度域まで広がり、とくに電流値に依存する。また、図中にハンピングビードの生成範囲をあわせて示したが、その限界は $W/P \leq 1$ の高速度側の限界に定性的に類似した傾向にあり、小電流、高電圧ほど低速度でハンピングビードが発生する。

うもれアークを利用すれば小入熱、深溶込み溶接が可能になることを述べたが、とりわけ所要入熱量を低下させるにはうもれアーク範囲内でのさらに詳細な条件検討が必要となる。

種々の溶接条件での入熱量 H と溶込み深さ P の関係を平板溶接の実験から求めた結果を Fig. 4 に示す。 P/H はアーク電圧と速度に大きく依存するが、電流にはほとんど影響されない。すなわち、低アーク電圧ほど、また 1m/min 以下の範囲で高速度ほど P/H は増大する。一方、溶込み深さは電流と速度に依存するがアーク電圧にはほとんど影響されない。したがって、アークの安定な範囲内で電圧を低下させ速度を 1m/min 以上とし、必要溶込み深さに応じて溶接電流を選定した溶接条件の組合せが小入熱溶接にもっとも適したものといえる。

KX法、LH法では、以上の実験結果に基づきビード形状などの作業性を考慮のうえ溶接条件が決定されている。

2・3・2 ホット・トップ作用

L 極で深溶込みビードを形成した場合、最終凝固位置に相当する溶接金属中央部に高温割れが発生しやすくなる。この割れの防止には多電極によるホット・トップ法で溶接金属の凝固を上方に偏向させることが有効である。そのための基本条件は後続電極の位置と熱量の適正化であり、理想的には先行電極による溶接金属の凝固末期にできるだけ大きな熱量を上方に与えることである。

ホット・トップ作用の機構について、LH法での凝固形状を例示して説明する。凝固の進行状態は、溶接途中に溶融池内の金属を瞬間的に排出し、溶融池固体壁形状を現出させて調べることができる。Fig. 5 は 3 電極片面溶接金属の凝固の進行

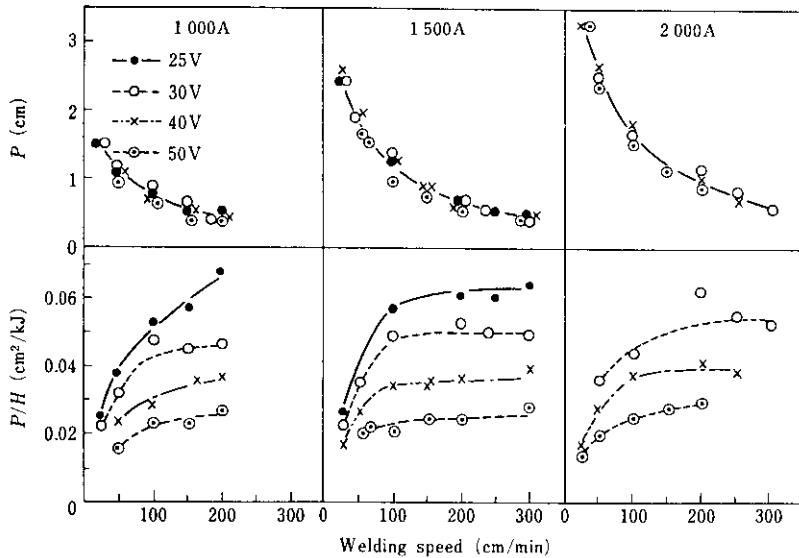


Fig. 4 Relation between penetration depth, P (cm), and welding parameters such as heat input, H (kJ/cm), and welding speed

を示し、**Photo. 4** がこの場合のビード形状の変化の状況である。**Fig. 5** において、L 極から 50mm の位置で中間極（以下 M 極と記す）の熱源が与えられ、ビード上部に相当する c 位置（裏面から 25mm 高さの位置）が溶かされるのに対し、下部の a 位置（裏面から 5mm 高さの位置）では凝固

が進行し、その結果、結晶が下方から上方に向って成長する。同様に T 極アークの位置でも、T 極が L, M 極の溶接金属に対してホット・トップ作用をし、**Photo. 4** に見られるように片面溶接であるにもかかわらず、溶込みが浅く幅の広いビードに類似した良好な形状で凝固が進行する。

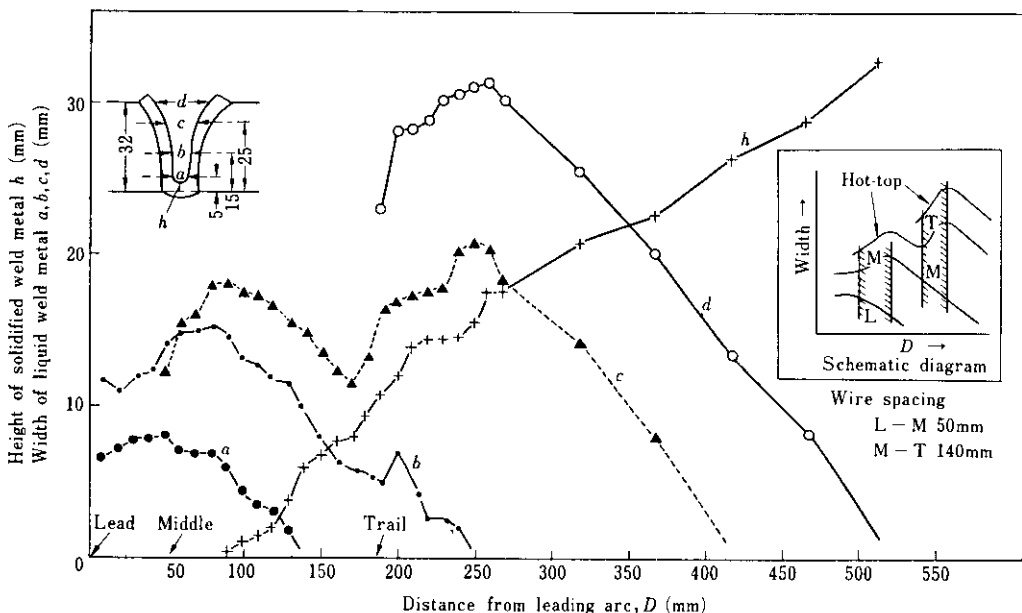


Fig. 5 Solidification diagram of weld metal by three-wire submerged-arc

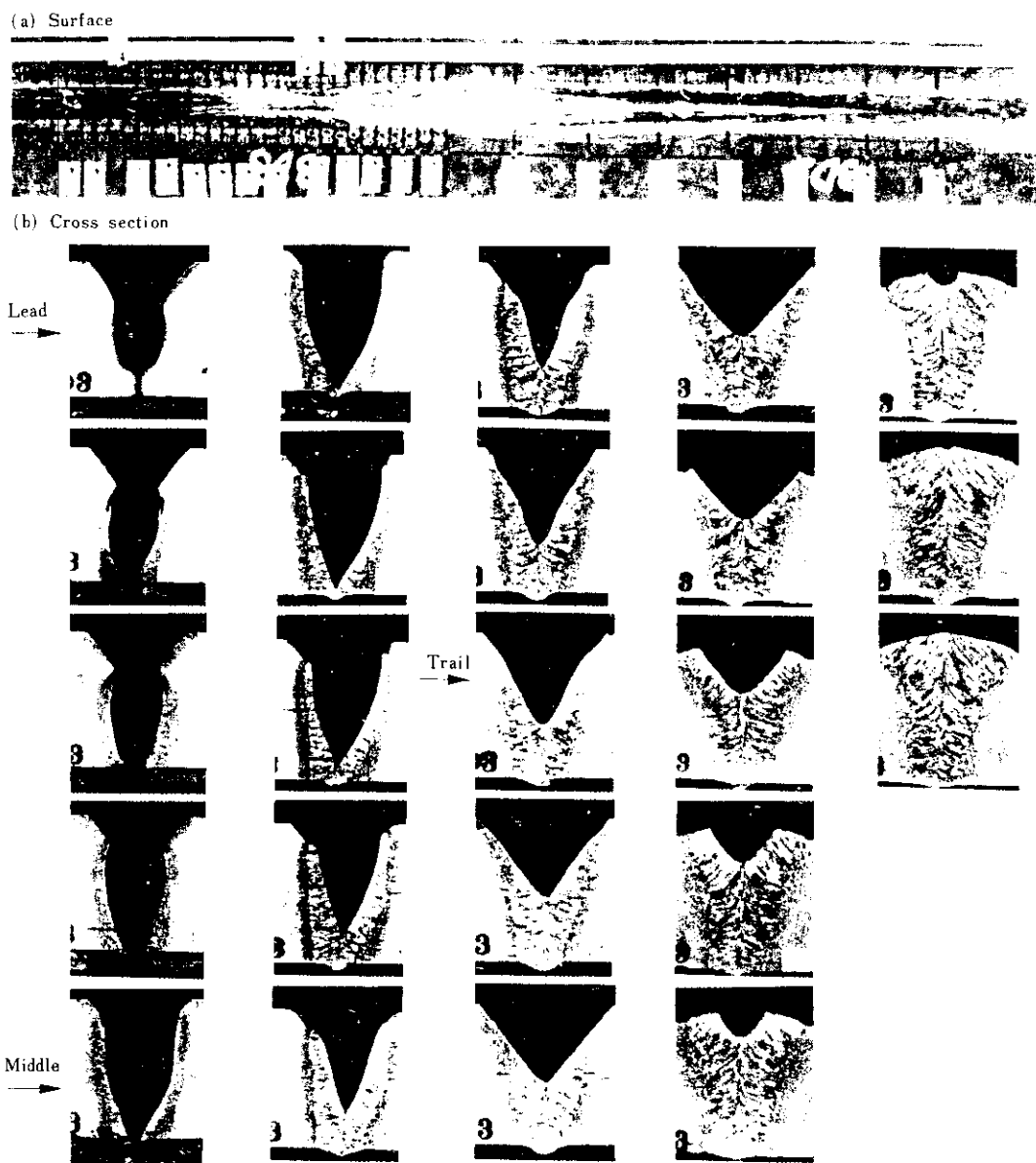


Photo. 4 Solidification pattern of weld metal by three-wire submerged-arc
(wire spacing : L-M 50mm, M-T 140mm)

以上のように、後続極の熱を効果的に利用することにより深溶込みビード特有の凝固割れを防止できる。

3. KX 法および LH 法の低温用アルミキルド鋼への適用

3・1 溶接入熱の予備的検討

LPG, LNG 船などに適用される U.S.C.G.規格では、Fig. 6 に示すように、HAZ の種々の位置

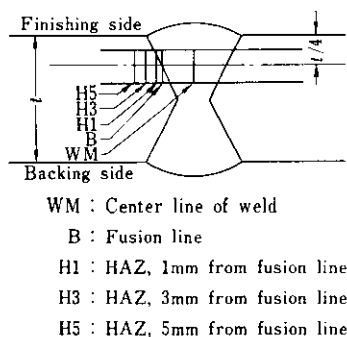


Fig. 6 Charpy V-notch specimen removal details in U.S.C.G. rules

での V ノッチシャルピー衝撃試験が義務づけられ、使用温度よりも 5°C 低い試験温度で平均 $2.8\text{kg}\cdot\text{m}$ 、最小 $1.8\text{kg}\cdot\text{m}$ 以上の吸収エネルギーが要求される。なお、試験温度は LPG 船タンク材に対して -51°C 、LNG 船タンク周辺部材に対して $-20^{\circ}\sim-40^{\circ}\text{C}$ になる場合が多い。

これらの部材に使用される鋼材はほとんどが低炭素アルミキルド鋼である。そこで、この種の鋼の HAZ 特性について溶接入熱の異なる 3 種類の溶接法 (KX, LH および一般的片面溶接法) で継手を作成して調べた結果を Fig. 7 に示す。また Photo. 5 にそのマイクロ組織の変化を示すが、入

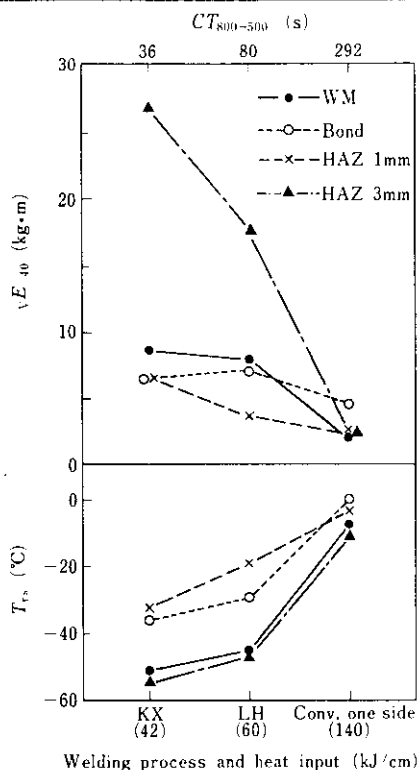


Fig. 7 Charpy impact test results of weld zone by various welding processes for Al-killed steel plate with 0.09%C, 0.21%Si, 1.38%Mn, 0.12%Cu, 0.21%Ni, and 0.12%Cr (welding wire : KW-101B, flux : KB-110)

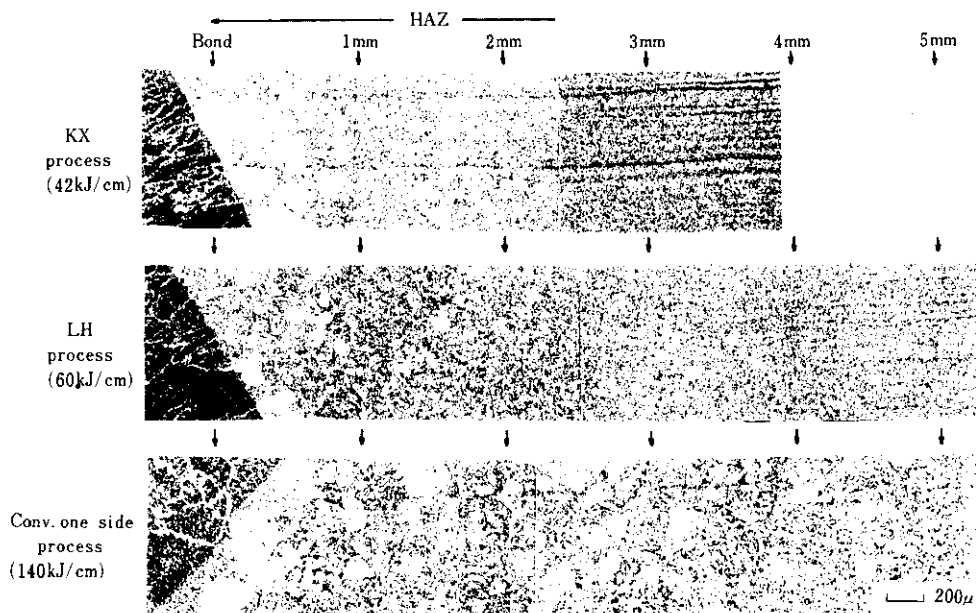


Photo. 5 Comparison of HAZ microstructure of weld zone for some levels of heat input (steel A 20mmt, initial plate temperature 20°C)

熱量の増加につれてボンド近傍での粗大結晶域が広がり、それに対応して靱性の低下がみられる。したがって、この鋼の溶接に際しては入熱量の制限が必要であり、少なくとも一般的なサブマージアーク片面溶接やエレクトロスラグ溶接などの大入熱溶接法の適用は不可能となり、小入熱溶接法である KX, LH 法の優位性が明らかである。

3・2 LNG 船タンク周辺部材の溶接継手性能

Table 1 に示す 3 種類の鋼板を用いて KX 法, LH 法の溶接継手特性について検討した。供試鋼板は、独立タンク方式 LNG 船のタンク周辺部材用として製造されたものである。C 鋼は設計温度が -35°C となるタンク・スカート部に使用され

る鋼であり、溶接部のシャルピー試験温度は -40°C でもっとも低温になる。A, B 鋼は船殻用 E 級鋼と基本的には同じ特性の鋼であるが、タンクからやや離れた位置で設計温度が $-15^{\circ}\sim-27^{\circ}\text{C}$ になる部材に使用される。同時に供試ワイヤ・フラックスの組合せを Table 1 に示す。溶接金属の低温靱性を向上させるには 2.5% または 3.5%Ni のワイヤを用いるほうがよいが、母材との強度バランスを考慮し、軟鋼に対しては 0.5%Mo の KW-50C を、HT-50 鋼に対しては 0.8%Ni, 0.4%Mo の KW-101B を用いた。フラックス KB-110 は大電流、高速条件での作業性と性能を備えた塩基性焼成型のものである。試験条件を Table 2 に示す。

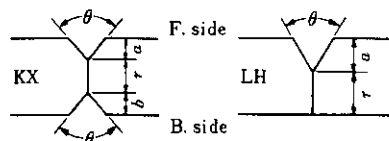
KX 法および LH 法による継手の衝撃試験結

Table 1 Plates and welding materials for testing weld joint at inner hull of LNG tanker

Base plate													Welding material	
Steel	Thick- ness (mm)	Y.P. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	Chemical composition (%)									Wire	Flux
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	V	Al		
A	22	29	43	0.09	0.30	1.30	0.009	0.006	—	—	—	0.027	KW-50C	KB-110
B	16	33	48	0.12	0.38	1.44	0.013	0.007	—	—	0.039	0.029	KW-101B	
	32	32	47											
C	25	36	51	0.13	0.29	1.43	0.011	0.007	0.23	0.14	0.038	0.024		

Table 2 Welding parameters for testing weld joint at inner hull of LNG tanker

Welding process	Thick-ness (mm)	Joint geometry				Lead			Trail			Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
		a (mm)	b (mm)	r (mm)	θ (deg)	Wire dia. (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Wire dia. (mm)	Current (A)	Voltage (V)		
KX	22	6	6	10	90	4.0	1 000	30	4.8	900	45	90	47
	25	7	6	12	90	4.0	1 100	30	4.8	900	45	90	49
	32	8	8	16	90	4.0	1 300	30	4.8	1 050	45	90	58
LH	16	7	—	9	90	4.0	1 400	30	6.4	1 100	40	110	47
	22	13	—	9	60	4.0	1 400	30	6.4	1 100	40	77	67
	25	15	—	10	60	4.0	1 400	30	6.4	1 100	40	70	74
	32	17	—	15	70	4.0	1 400	30	6.4	1 100	40	37	140



果を Fig. 8, 9 に、溶接金属の化学分析結果を Table 3 に示す。溶接金属部は両溶接法で良好な特性が得られ、U.S.C.G.規格を十分に満足した。また、熱影響部についてもすべての鋼種で KX 法、LH 法ともに規格を満足し、これらの溶接法の LNG 船内タンク周辺部材への適用が可能であることが明らかになった。しかし、LH 法の場合には B 鋼(板厚 32mm)および C 鋼のボンド、HAZ 1 mm 位置で規格値近くの吸収エネルギーしか得られなかったことから、鋼種、板厚などを考慮して適用限界を慎重に決める必要がある。

HAZ の衝撃特性は鋼種によって大きな差がみられ、強度の低い A 鋼では粗粒部、細粒部ともきわめて良好であるのに対し、強度の高い B、C 鋼では粗粒部での劣化が認められる。

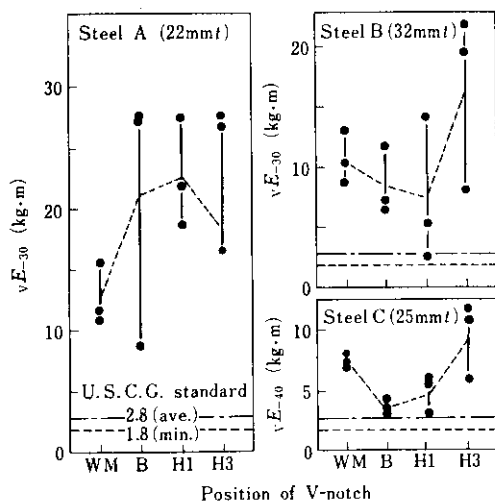


Fig. 8 Absorbed energy in Charpy impact test of Al-killed steel weld zone by KX process

16mm 厚と 32mm 厚の B 鋼を LH 法で溶接した場合、鋼板組成が同じであるにもかかわらず板厚によって HAZ 靱性に著しい差が生じた。この原因は、入熱量が 16mm 厚の継手では板厚 1mm あたり 2 900 J/cm であるのに対し、32mm 厚の継手では 50% 増の 4 300 J/cm に達したため、後者の粗大結晶の範囲が前者に比較して倍増したことにある。

継手引張試験では、各継手に対し適度な引張強さが得られた。曲げ試験では欠陥が発生せず十分な延性が得られた。

以上のように、設計温度が -35°C (衝撃試験温度 -40°C に相当)になる LNG 船のタンク周辺部材の溶接に対し、KX、LH 法は品質、能率を兼ね備えた溶接方法となる。

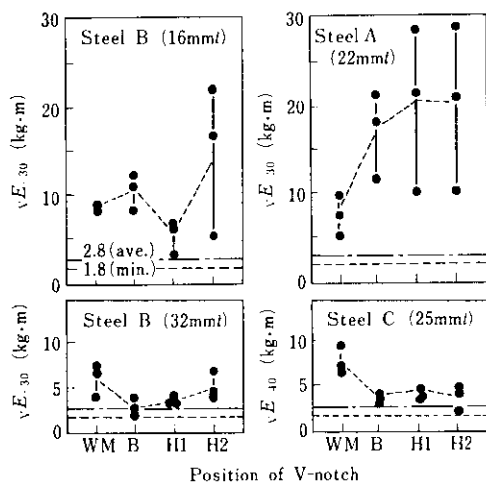


Fig. 9 Absorbed energy in Charpy impact test of Al-killed steel weld zone by LH process

Table 3 Chemical compositions of weld metal

Welding process	Steel	Thickness (mm)	Chemical composition (%)								
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cu	V
KX	A	22	0.07	0.27	1.29	0.012	0.008	—	0.16	0.08	—
	B	32	0.09	0.33	1.44	0.012	0.009	0.34	0.18	0.07	0.026
	C	25	0.10	0.27	1.39	0.013	0.009	0.44	0.16	0.15	0.026
LH	A	22	0.08	0.29	1.30	0.010	0.008	—	0.14	0.06	—
	B	16	0.10	0.35	1.51	0.015	0.009	0.27	0.13	0.06	0.028
	B	32	0.09	0.32	1.45	0.012	0.008	0.32	0.16	0.06	0.024
	C	25	0.10	0.28	1.40	0.010	0.008	0.42	0.14	0.14	0.023

3.3 LPG 船タンク材の溶接継手性能

LPG 船タンクの継手衝撃試験温度は -51°C の低温になることが多く、その溶接では通常、入熱量を 40kJ/cm 以下にして施工されており、場合によっては 25kJ/cm にまで減らされる。したがって、この従来法では 16mm 厚程度の鋼板でもかなりの多層盛施工になり、さらに裏はつりを必要とする

ためきわめて作業能率が低い。

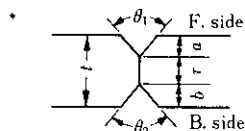
ここでは、Table 4 に示す LPG タンク用に製造された強度の異なる 2 種類の鋼板を用いて、KX 法の継手性能について検討した。なお、比較のため従来技術による小入熱多層溶接継手についても試験した。同時に供試材の組合せを Table 4 に、溶接条件を Table 5 に示す。KX 法では、先に述べたように板厚の増加に比例して入熱量が増大

Table 4 Plates and welding materials for testing weld joint at tank of LPG tanker

Base plate													Welding material	
Steel	Thick- ness (mm)	Y.P. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	Chemical composition (%)									Wire	Flux
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V	Al		
D	16	33	45	0.06	0.27	1.40	0.011	0.006	0.24	—	—	0.021	KW-50C	KB-110
	20	32	44											
E	12	37	51	0.09	0.28	1.49	0.010	0.005	0.27	0.16	0.031	0.025	KW-101B	
	16	37	50											
	20	36	49											
	25	37	51											

Table 5 Welding parameters for testing weld joint at tank of LPG tanker

Welding process	Thick-ness t (mm)	Joint geometry *				Number of passes	Welding parameters **				Heat input (kJ/cm)	Cooling time from 800° to 500°C (s)
		a (mm)	b (mm)	r (mm)	θ_1, θ_2 (deg)		Wire dia. (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)		
KX	12	4	4	4	90	2	4.0	900	26	120	26	—
					90		4.8	700	40			
	16	4	4	8	90	2	4.0	1 000	30	110	38	63
					90		4.8	900	45			
	20	5	5	10	90	2	4.0	1 100	30	105	43	55
					90		4.8	950	45			
	25	7	7	11	90	2	4.0	1 100	30	90	49	46
					90		4.8	950	45			
ML	12	—	6	6	50	2	3.2	500	30	40	23	—
	16	—	9	7	50	3	3.2	550	30	37	27	37
	20	—	13	7	50	4	3.2	550	30	37	27	—
	25	6	14	5	90, 50	8	3.2	500	30	35	26	—
MH	12	—	5	7	60	2	4.0	620	30	37	29	78
	20	—	12	8	60	3	4.0	650	30	34	34	41
	25	—	8	17	50	4	4.0	650	30	34	34	30



** ML, MH : Gouging at finishing side
Inter-pass temperature : 100°C

するが、溶接部の熱サイクルは板厚に関係なくほぼ同じになる。単電極サブマージアークの従来技術では、入熱量を 35kJ/cm にした場合（以下 MH と記す）と 25kJ/cm にした場合（以下 ML と記す）の 2 種類とした。溶接に際しては、予熱を行わずパス間温度 100°C とした。

Table 5 に CA 熱電対を用いて測定した最終パスでの冷却時間 $CT_{800 \rightarrow 500}$ （母板の初期温度：100°C）をあわせて示した。 $CT_{800 \rightarrow 500}$ は入熱量に対応し、ML, MH, KX 法の順に増加している。

-51°C における吸収エネルギーを Table 6 に、E 鋼の場合について各継手ごとに U.S.C.G. 規格に

Table 6 Absorbed energy in Charpy impact test at -51°C for steel D and E

Steel	Welding process	Thickness (mm)	$\sqrt{E_{-51}}$ (kg·m)*			
			WM	Bond	HAZ 1mm	HAZ 3mm
D	KX	16	$\frac{5.7 \sim 4.8}{5.3}$	$\frac{9.7 \sim 2.9}{5.7}$	$\frac{10.4 \sim 3.3}{7.2}$	$\frac{17.2 \sim 16.7}{16.9}$
		20	$\frac{11.5 \sim 8.7}{9.7}$	$\frac{18.9 \sim 9.5}{15.5}$	$\frac{9.9 \sim 3.5}{6.4}$	$\frac{19.9 \sim 17.0}{18.2}$
	ML	16	—	$\frac{14.1 \sim 6.6}{11.1}$	$\frac{13.7 \sim 2.0}{8.6}$	$\frac{14.4 \sim 11.0}{13.2}$
	MH	20	$\frac{7.0 \sim 5.5}{6.2}$	$\frac{16.2 \sim 3.3}{11.5}$	$\frac{12.5 \sim 5.8}{8.8}$	$\frac{18.2 \sim 2.2}{7.7}$
E	KX	12	$\frac{15.7 \sim 10.3}{13.7}$	$\frac{4.2 \sim 2.6}{3.2}$	$\frac{4.0 \sim 2.2}{3.0}$	$\frac{9.0 \sim 3.1}{5.4}$
		16	$\frac{15.5 \sim 10.5}{12.5}$	$\frac{4.5 \sim 3.7}{4.2}$	$\frac{4.4 \sim 3.0}{3.5}$	$\frac{16.5 \sim 5.7}{10.0}$
		20	$\frac{12.3 \sim 8.6}{9.8}$	$\frac{5.3 \sim 3.3}{4.1}$	$\frac{4.0 \sim 3.4}{3.8}$	$\frac{10.0 \sim 4.0}{6.4}$
		25	$\frac{11.2 \sim 8.2}{9.4}$	$\frac{4.2 \sim 3.4}{3.8}$	$\frac{6.6 \sim 3.1}{5.3}$	$\frac{6.9 \sim 3.2}{5.0}$
	ML	12	—	$\frac{6.8 \sim 3.4}{4.6}$	$\frac{14.1 \sim 6.1}{10.3}$	$\frac{17.2 \sim 10.1}{12.5}$
		16	—	$\frac{4.6 \sim 2.5}{3.5}$	$\frac{5.0 \sim 3.4}{3.9}$	$\frac{5.0 \sim 2.0}{3.8}$
		20	—	$\frac{3.4 \sim 3.0}{3.3}$	$\frac{5.3 \sim 1.9}{3.2}$	$\frac{4.3 \sim 1.9}{2.8}$
		25	—	$\frac{10.1 \sim 5.8}{7.5}$	$\frac{13.2 \sim 5.2}{8.5}$	$\frac{3.2 \sim 2.0}{2.5}$
	MH	12	$\frac{10.8 \sim 9.8}{10.2}$	$\frac{9.1 \sim 3.1}{6.2}$	$\frac{3.3 \sim 1.9}{2.4}$	$\frac{6.7 \sim 2.0}{3.9}$
		20	$\frac{17.6 \sim 16.7}{17.2}$	$\frac{3.9 \sim 2.9}{3.3}$	$\frac{2.9 \sim 2.5}{2.7}$	$\frac{14.5 \sim 7.4}{11.8}$
		25	$\frac{17.9 \sim 16.4}{17.0}$	$\frac{5.3 \sim 4.0}{4.5}$	$\frac{5.0 \sim 3.8}{4.4}$	$\frac{5.0 \sim 2.7}{3.6}$

* $\frac{\text{max.} \sim \text{min.}}{\text{ave.}}$

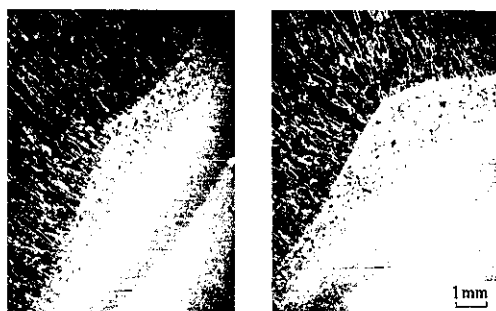
対する合否を判定した結果を Table 7 に示す。Table 7 において ○, △ 表示ともに合格であるが, △ 表示は規格で最小値と平均値との間に相当する 1.8~2.8kg・m の値が含まれている場合であり, 比較的余裕のない合格といえる。Table 6, 7 から次のことが明らかになった。

- (1) 一般的に, ボンド近傍の粗粒部では入熱量が大きいほど靱性が低下する。Table 7 で粗粒部に相当するボンド, HAZ 1mm の靱性は MH (35 kJ/cm) の板厚の小さい場合に劣化し, この点から従来技術では ML の 25kJ/cm が限界入熱条件となる。しかし, KX では MH より大入熱であるにもかかわらず, いずれの板厚でも靱性にすぐれている。
- (2) 細粒部に相当する HAZ 3mm 位置の靱性は, KX, MH, ML の順に低下し, ML では入熱量が小さいにもかかわらず E 鋼の場合に規格値を満足しないことがある。
- (3) E 鋼よりも強度の低い D 鋼のほうが HAZ 特性にすぐれている。
- (4) Ni-Mo 系ワイヤを用いた E 鋼継手の溶接金属は, Mo 系ワイヤで溶接した D 鋼継手のそれに比較して靱性に富んでいる。
- (5) LPG タンクの溶接方法として KX 法がもっともすぐれており, すべての板厚で U.S.C.G. 規格を満足できるが, その他の方法では熱影響部のいずれかの位置で不合格になる。

熱影響部のうちボンド近傍は, すべての溶接法でフェライト, ペイナイトの混合組織になっている。この部分の靱性を改善するには, 鋼板組成も

しくは溶接法によって結晶粒の粗大化を抑制することと 2 次組織の制御が考えられる。靱性にすぐれた組織として下部ベイナイトあるいは微細フェライトが考えられるが, 比較的強度の低いこの種の鋼では, いかなる溶接法を用いても前者の組織になるような冷却速度を得ることができない。一方, フェライト量を増大させるため溶接入熱を大にして $CT_{800-500}$ を増加させても, 3・1 で検討したように, これは結晶粒の粗大化を伴うため結果的に靱性が低下する。したがって, ボンド近傍部のぜい化を防止するには, 溶接入熱をできるだけ小さくして結晶を粗大にしないことが溶接手法としての最善策といえる。

KX 法は 35kJ/cm の MH よりも大入熱であるにもかかわらず, ボンド, HAZ 1mm 位置の特性にすぐれていたが, これは Photo. 6 に示すミクロ組織から明らかのように KX 法のほうが粗粒



(a) KX (43kJ/cm)

(b) MH (34kJ/cm)

Photo. 6 Comparison of microstructure of weld zone by KX and MH processes (steel E)

Table 7 Evaluation of notch toughness of steel E for various welding processes

Plate thickness (mm)	Bond			HAZ 1mm			HAZ 3mm			Through HAZ		
	KX	ML	MH	KX	ML	MH	KX	ML	MH	KX	ML	MH
12	△	○	○	△	○	×	○	○	△	△	○	×
16	○	△	—	○	○	—	○	△	—	○	△	—
20	○	○	○	○	△	×	○	×	○	○	×	×
25	○	○	○	○	○	○	○	×	△	○	×	△

Classification by $\sqrt{E_{51}}$ (kg・m) $\left\{ \begin{array}{l} \text{○ : Minimum value} \geq 2.8 \\ \text{△ : Average value} \geq 2.8 \text{ and minimum value} \geq 1.8 \\ \text{× : } \quad \quad \quad \leq 2.8 \text{ or } \quad \quad \quad \leq 1.8 \end{array} \right.$

化していないためであり、MHが溶込みの浅い幅の広いビードであるのに対し、KX法ではたて長のビード形状になり冷却面が増加すること、母板溶融効率が高いことなどが有効に作用したと考えられる。

また、細粒組織になる HAZ 3mm 位置の Vノッチシャルピー値は入熱小、板厚大ほど、すなわち $CT_{800-500}$ の値が小さいほど低下する傾向がある。この部分はフェライト、パーライト組織になるが、鋼材自体の焼入れ性を低下させるか、2次組織を決定する温度域での冷却速度を小さくする溶接を行い、微細フェライトの量を増加させれば靱性が向上する。このことから、Table 5 で $800^{\circ}\sim 500^{\circ}\text{C}$ の冷却時間の大きい KX 法がもっとも良好な特性を示した。

以上のように、HAZの内部でもボンド近傍部とそれより離れた細粒部とは靱性に対し異なった特性を示し、前者に対しては粗粒化を抑制できる小入熱溶接が、後者に対しては2次組織を改善できる大入熱溶接が有効となる。したがって、低温用アルミキルド鋼板の溶接法としては、ボンド近傍の高温加熱域に対して溶接条件より求まる入熱量よりも小入熱溶接の性質を示し、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態温度付近では入熱量相当の冷却速度となる KX 法が最適であると結論づけられる。

さらに溶接手法上、HAZの特性改善には高温

での冷却速度に対する影響が比較的少なく、変態温度近くのそれに対する効果の大きい予熱の利用が考えられる。E鋼を用いて KX 法で母板の初期温度を変化させ、溶接部の靱性を調べた結果が Fig. 10 である。その場合のマイクロ組織の一例を Photo. 7 に示す。これまでの結果から予想されるように、母板初温を変化させてもボンドおよび HAZ 1mm 位置の吸収エネルギーはほとんど変化しないが、HAZ 3mm 位置での値は $CT_{800-500}$ の増大に対応して向上した。したがって、予熱およびパス間温度を $100^{\circ}\sim 200^{\circ}\text{C}$ に設定すれば、より靱性にすぐれた継手を得ることができる。

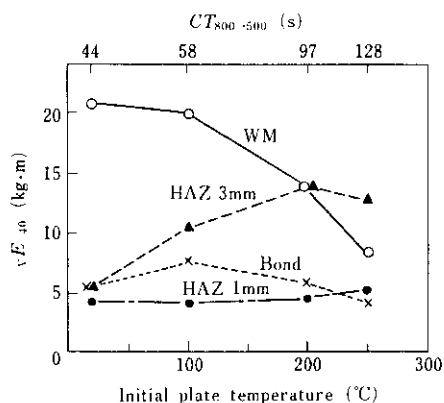


Fig. 10 Effect of initial plate temperature on Charpy V-notch impact strength in weld zone by KX process (steel E 20mm ℓ)

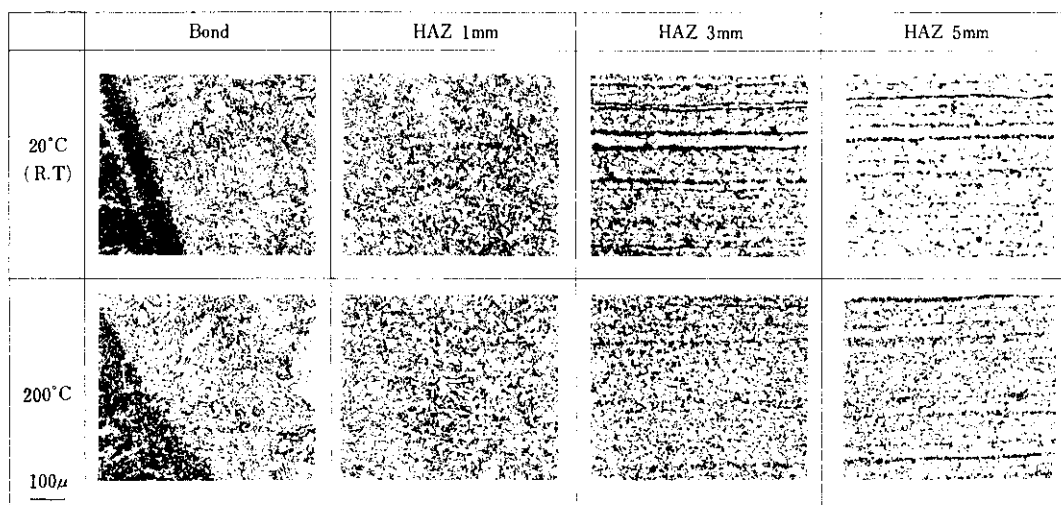


Photo. 7 Comparison of HAZ microstructure of weld zone by KX process for initial plate temperature of 20°C and 200°C (steel E 20mm ℓ , 43kJ/cm)

KX 法は継手の性質にすぐれているとともに、従来技術に比較してパス数を減少でき、さらに高速条件であることから能率を著しく向上できる。このように、この溶接方法は継手性能と能率をかね備えた合理的方法といえる。

4. ま と め

LPG 船、LNG 船に用いられる低温用アルミキルド鋼の溶接に両面 1 層および片面 1 層溶接で所要入熱を低減させた高能率な KX, LH 法の適用を検討し、以下の結論が得られた。

- (1) KX 法はもっとも試験温度の低い(-51°C) LPG 船タンクの溶接にも適用でき、品質、能率ともにすぐれた溶接法である。
- (2) LH 法は、試験温度 -40°C 程度の LNG 船タ

ンク周辺部材の溶接に適用することができる。

- (3) 従来法では、たとえば入熱量を 25kJ/cm に制限した小入熱多層溶接でも、HAZ の靱性で LPG 船タンクに対する規格値を満足しない場合がある。
- (4) HAZ の低温靱性を確保するには、ボンド近傍部に対し入熱量を低減させることが、それよりもやや離れた細粒部に対し $800^{\circ}\sim 500^{\circ}\text{C}$ の冷却時間を大にすることが有効である。
- (5) KX 法は、ボンド近傍に対し溶接条件より求まる入熱よりも小入熱溶接の性質を示し、細粒部に対し入熱相当の熱サイクルを与えることから、低炭素アルミキルド鋼の溶接に最適の方法となる。
- (6) 予熱およびパス間温度を高くすれば、靱性は溶接金属部で低下するが HAZ 部では向上する。
- (7) 焼入れ性の少ない低強度の鋼板ほど HAZ の靱性にすぐれている。

参 考 文 献

- 1) 日本溶接協会造船部会溶接施工委員会編：造船施工法ハンドブック，(1973)，441，〔産報〕
- 2) J. Tsuboi, K. Akahide and K. Agusa: The Symposium on Advanced Welding Technology, Osaka, Aug., (1975), 2-3-1,
- 3) K. Akahide, K. Agusa and J. Tsuboi: An International Conference on Structural Design and Fabrication in Ship Building, London, Nov., (1975), 131
- 4) 安藤，長谷川：溶接アーク現象，(1967)，283，〔産報〕
- 5) 坪井，赤秀，阿草，浮辺：溶接学会溶接法研究委員会資料 SW652-74，(1974)