

ケミカルタンカー用 TMCP 型 KSUS329J3L クラッド鋼板の開発

嶋村純二^{*1)} 寒沢 至^{*1)} 横田智之^{*1)} 村上善明^{*2)}
小野知宏^{*3)} 緒方洋典^{**} 勝田順一^{***} 矢島 浩^{****}

1. 緒 言

ケミカルタンカーのカーゴタンクは過酷な腐食環境やスロッシング等に耐える必要があり、高耐食性・高強度のステンレスソリッド鋼板やステンレスクラッド鋼板が使用される⁽¹⁾。従来、カーゴタンクの部位の中で、外周にはオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板(合せ材:KSUS316L)、隔壁にはオーステナイト系ステンレスソリッド鋼板が主に用いられてきた。一方、近年、耐食性向上の観点から隔壁への二相ステンレス鋼(KSUS329J3L)の適用事例が増加している⁽²⁾。

二相ステンレス鋼(KSUS329J3L)のNi含有量はオーステナイト系ステンレス鋼(KSUS316L)の約1/2程度であり⁽³⁾、ケミカルタンカーのカーゴタンクに適用できれば省資源化の効果が大きい。また、二相ステンレス鋼(KSUS329J3L)の降伏強度は、オーステナイト系ステンレス鋼(KSUS316L)の約1.5倍程度あり、二相ステンレス鋼(KSUS329J3L)を用いたクラッド鋼板やソリッド鋼板を組み合わせて使用すれば、船体重量軽減に寄与することができる。

JFE スチールでは高耐食クラッド鋼板を製造しており⁽⁴⁾、今回、ケミカルタンカーのカーゴタンクに使用可能な、二相ステンレス鋼(KSUS329J3L)を合せ材とするTMCP型KSUS329J3Lステンレスクラッド鋼板を開発した。本稿では開発鋼の特徴ならびに性能について紹介する。

2. TMCP 型 KSUS329J3L クラッド鋼板の開発コンセプト

図1にケミカルタンカーのカーゴタンク断面模式図を示す。日本国内建造のケミカルタンカーのカーゴタンクには、主にオーステナイト系ステンレス鋼(KSUS316L)を合せ材としたステンレスクラッド鋼板が使用されてきたが⁽¹⁾、ヨーロッパでは二相ステンレス鋼のカーゴタンクが主流であり⁽⁵⁾、日本国内建造のものでも、耐食性の面でカーゴタンクの隔壁に二相ステンレス鋼(KSUS329J3L)を適用する事例が増えている。KSUS329J3Lは溶体化処理により優れた耐食性を示すが、900°C前後の温度域では、金属間化合物などの耐食性を劣化させる有害な析出物が生成しやすいという特性がある⁽⁶⁾。従って、KSUS329J3Lクラッド鋼板製造において、熱間圧延ままでは析出物による耐食性劣化が生じ、溶体化処理状態では母材の機械的特性が劣化するという課題があった。そこで、圧延時にTMCP技術(thermo-mechanical control process)を適用することで、有害な析出物の生成とそれに伴う耐食性の劣化を抑制するとともに、機械的特性を両立させた。

図2に圧延クラッド鋼板の製造フローを示す。圧延クラッド鋼板は、爆着クラッド鋼や肉盛クラッド鋼と比較して、広幅、長尺鋼板の製造が可能であるとともに、良好な平坦度および板厚精度を有することが特徴である。図3にTMCP技術による析出物抑制の模式図を示す。加速冷却を適用するこ

* JFE スチール株式会社 スチール研究所 鋼材研究部；
1)主任研究員 2)部長
3)西日本製鉄所 鋼材商品技術部 主任部員
** 株式会社白杵造船所 *** 長崎大学(現在；愛媛大学)
**** 矢島材料強度研究所
Development of TMCP Type KSUS329J3L Clad Steel Plates for Chemical Tankers; Junji Shimamura*, Itaru Samusawa*, Tomoyuki Yokota*, Yoshiaki Murakami*, Tomohiro Ono*, Hironori Ogata**, Junichi Katsuta*** and Hiroshi Yajima**** (*JFE Steel Corporation. **Usuki Shipyard. ***Nagasaki University. ****Yajima Material Integrity Laboratory)
2020年10月26日受理[doi:10.2320/materia.60.51]

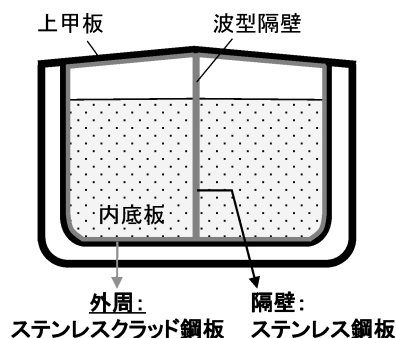


図1 ケミカルタンカーのカーゴタンク断面(模式図)。

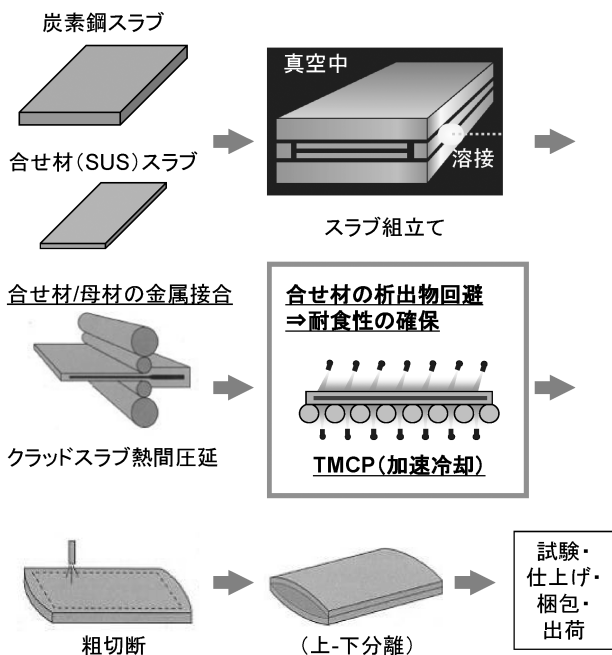


図2 圧延クラッド鋼の製造フロー。

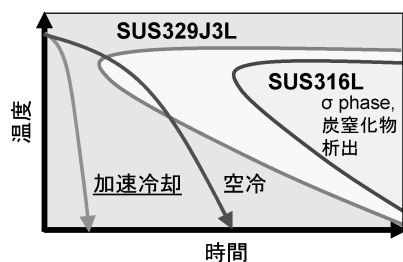


図3 TMCP技術による析出物抑制(模式図)。

とにより、圧延後冷却過程において析出領域を避け、合せ材の二相ステンレス鋼の耐食性を確保し、同時に、クラッド鋼板の母材部の強度、靱性、伸び等、機械的性質の目標を達成することを狙った。

3. TMCP型KSUS329J3Lクラッド鋼板の特性

(1) 母材特性

今回開発したTMCP型KSUS329J3Lクラッド鋼板の合せ材部分のマイクロ組織を図4に示す。フェライト相とオーステナイト相がおおよそ1:1の組織を呈しており、金属間化合物などの耐食性に有害な析出物は生成していない。

TMCP型KSUS329J3Lクラッド鋼板の耐孔食性および耐りん酸腐食性を表1に示す。耐孔食性はJIS G 0578 B法に準拠した、塩化第二鉄腐食試験により評価した。孔食発生臨界温度：CPT(Critical Pitting Temperature)は、溶体化処理：ST(Solution treatment)を施したKSUS329J3Lと同等の50℃であり、優れた耐孔食性を有している。耐りん酸腐食性は、積荷となる粗製りん酸を模擬した50℃の試験溶液(50%P₂O₅+3%H₂SO₄+0.5%Fe³⁺+0.5%F⁻+0.03%Cl⁻)に腐食試験片を120時間連続浸漬させ、試験前後の重量変化

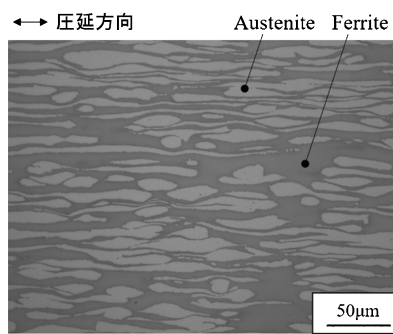


図4 TMCP型KSUS329J3Lクラッド鋼合せ材のマイクロ組織。

表1 TMCP型KSUS329J3Lクラッド鋼板の耐食性。

	CPT*1 (°C)	腐食速度*2 (mm/y)
KSUS329J3L クラッド鋼板 (TMCP)	50	0.0
KSUS329J3L ソリッド鋼板 (ST)	50	0.0

*1 CPT : Critical pitting temperature (孔食発生臨界温度)
ST : Solution treatment (溶体化処理)

*2 りん酸浸漬試験(50℃, 120時間)
50%P₂O₅+3%H₂SO₄+0.5%Fe³⁺+0.5%F⁻+0.03%Cl⁻

表2 TMCP型KSUS329J3Lクラッド鋼板の機械的特性。

板厚 (mm)		引張試験*1			シャルピー試験*2
炭素鋼	KSUS329J3L	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	vE-20 (J)
13	3	450	557	22	387
KD36仕様		≥373	≥515	≥17	≥34

YS : Yield strength (降伏強度), TS : Tensile strength (引張強度),
El : Elongation (伸び), vE-20 : -20℃でのシャルピー衝撃吸収エネルギー

*1 全厚引張試験, *2 シャルピー衝撃試験(炭素鋼部分)

から算出した腐食速度により評価した。腐食速度は溶体化処理を施したKSUS329J3Lと同等の0.0 mm/yであり、りん酸中における安定した耐食性を確認している。

表2にKSUS329J3Lクラッド鋼板の引張試験の結果と、母材の-20℃における衝撃吸収エネルギーを示す。引張試験片はクラッド鋼の母材および合せ材の全厚から、衝撃吸収エネルギーを評価するシャルピー衝撃試験片は母材部から採取した。引張特性および衝撃吸収エネルギーはいずれも、KD36のスペックを満足している。

(2) 溶接継手特性

KSUS329J3Lソリッド鋼板では適正入熱量の範囲内での溶接が推奨されているが⁽⁷⁾⁽⁸⁾、KSUS329J3Lクラッド鋼板の溶接部に及ぼす入熱量の影響は明確でない。そこで、二相ステンレスクラッド鋼板溶接部の耐食性に及ぼす入熱量の影響を調査した。図5に溶接継手からの腐食試験片採取位置を示す。それぞれ塩化第二鉄腐食試験およびりん酸腐食試験を実施した。

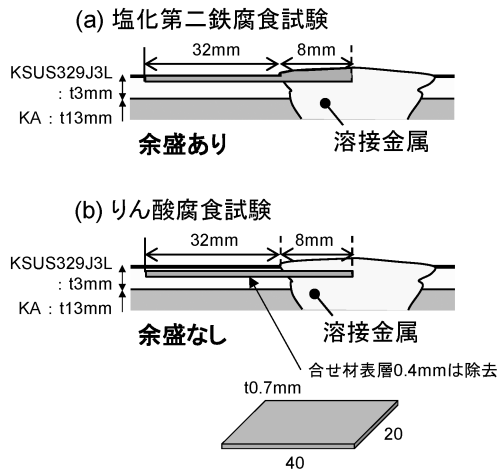


図5 溶接継手からの腐食試験片採取位置(模式図).

表3 塩化第二鉄腐食試験結果.

評価部		溶接継手部				クラッド鋼板部
溶接方法		FCAW		SAW		
入熱 (kJ/cm)		20	44	30	50	
CPT ^{*1} (°C)	KSUS329J3L クラッド	40	40	30	≤5	50
	KSUS316L クラッド	10	≤5	10	≤5	15
PRE ^{*2} (溶接金属)	KSUS329J3L クラッド	36.1	35.6	30.9	27.8	35.5

*1 CPT : Critical Pitting Temperature (孔食発生臨界温度)

*2 PRE = %Cr + 3.3 × (%Mo) + 16 × (%N)

試験片外観例
(FCAW 20kJ/cm, 40°C試験後)

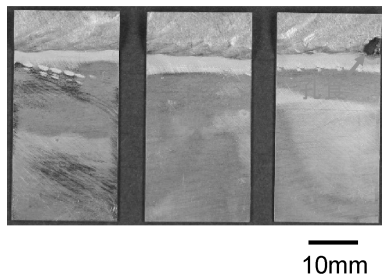


図6 塩化第二鉄腐食試験後の試験片外観例.

表3および図6に塩化第二鉄腐食試験結果を示す。KSUS329J3Lクラッド鋼板の溶接部のCPTは、KSUS316Lよりも高く、SAW 50 kJ/cmを除いて30°C以上の値であり、耐孔食性は良好であった。SAW 50 kJ/cmでは入熱量が大きく、母材との成分希釈の影響による溶接金属のPRE低下などが原因で、耐孔食性が劣化したものと推定される。耐孔食性確保の観点から、SAW 50 kJ/cm以上の過剰入熱は避けるべきと考えられる。

表4および図7にりん酸腐食試験結果を示す。今回開発した二相ステンレスクラッド鋼板は溶接部を含めてりん酸中で安定した耐食性を示した。

表4 りん酸腐食試験結果.

評価部		溶接継手部				クラッド鋼板部
溶接方法		FCAW		SAW		
入熱 (kJ/cm)		20	44	30	50	
腐食速度 (g/m ² ·h)	KSUS329J3L クラッド	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	KSUS316L クラッド	17.2	17.8	17.9	16.3	4.0

(参考)KSUS329J3L 溶体化処理材 : 0.0 g/m²·h

試験片外観例
(FCAW 20kJ/cm, 試験後)

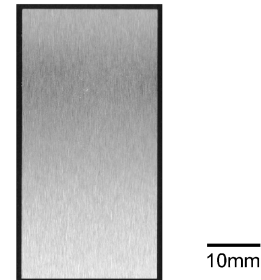


図7 りん酸腐食試験後の試験片外観例.

4. 実用化状況および特許

以上のように、TMCP型KSUS329J3Lクラッド鋼板は、溶接部も含め、優れた耐食性を有しており、KA, KB, KD, KA32~36, KD32~36において最大板厚16mmまで、日本海事協会から型式承認を取得している。また、溶接性および疲労特性についても問題のない特性を有していることを確認しており⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、ケミカルタンカーのカーゴタンクへの実船適用が進んでいる(2020年10月時点、6隻竣工済)。また、本技術に関連した特許も取得済みである⁽¹¹⁾。

TMCP型KSUS329J3Lクラッド鋼板の適用は、ケミカルタンカーの更なる経済性、安全性および信頼性向上への寄与が期待される。

文 献

- (1) 造船用鋼材. JFE 技報, 2(2003), 37-44.
- (2) 腐食センターニュース, 59(2012).
- (3) 日本海事協会 鋼船規則K編: 材料, (2018).
- (4) 高耐食クラッド鋼. JFE 技報, 33(2014), 75-76.
- (5) 例えば, Stainless Steel World December (1996), 10, 28-29.
- (6) Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels. 3rd edition, IMO, (2014).
- (7) 日本海事協会 “二相ステンレス鋼の溶接に関するガイドライン”, (2014).
- (8) 日本溶接協会 “二相ステンレス鋼の溶接施工ガイドライン”, (2017).
- (9) 緒方洋典, 堺田和昌, 春山雄介, 深井英明, 黒沼洋太, 勝田順一, 岡田公一, 矢島 浩, 安藤 翼, 福井 努: 日本海事協会誌, 322(2018), 151-164.
- (10) 勝田順一, 山下 晋, 緒方洋典, 春山雄介, 深井英明, 黒沼洋太, 矢島 浩: 圧力技術, 57(2019), 4-12.
- (11) 例えば, 特許第6477735号.