

石炭運搬船用高耐食性鋼板の開発

池田博司^{*1)} 塩谷和彦^{*1)} 伊木 聡^{*2)}
 山村直一^{*3)} 長谷和邦^{*4)}

1. 緒 言

海上を航行する船舶にとって、腐食はその寿命を左右する重要な問題である。海水に直接接触する船体はもとより、船体安定の為、海水を出し入れするバラスタック、荷油タンクおよびカーゴホールドなどの貨物積載部、そして、ポイドスペースなど、それぞれの環境に適した塗装もしくは防食対策方法が整備され、適用されてきた⁽¹⁾。一方、更なる安全性の確保や、安全性と経済性の両立の観点から、近年、造船用耐食鋼がクローズアップされ、これまでに、荷油タンク上甲板の全面腐食、荷油タンク底板の孔食に対応した耐食鋼⁽²⁾、バラスタックの塗膜下腐食に対応した耐食鋼⁽³⁾が開発、実船適用されている。

ばら積み貨物船においては、1990年代初頭に海難事故が相次ぎ発生し、国際的な問題となった⁽⁴⁾。特に、石炭船や石炭・鉱石兼用船で事故が多く報告されており、その原因の大部分はカーゴホールド(船倉)内の損傷であった。図1に石炭運搬船のカーゴホールド内の腐食状況を示す。側壁部、肋骨部において、多数のピット状腐食が発生している。このカーゴホールドの激しい腐食は、石炭に含まれる硫黄分が水分と反応し、希硫酸水溶液が生成することに起因すると考えられている⁽⁵⁾。腐食対策として、現在では、IACS(International Association of Classification Societies)により塗装や腐食に対する予備厚(例えば、シングルハル側壁で3.5 mmの板厚増加)の付与が義務づけられている⁽⁶⁾。しかし、石炭運搬船カーゴホールドでは、塗膜は積荷や荷役装置との接触により剥離するため長期の防食効果は期待できず、再塗装が必要と

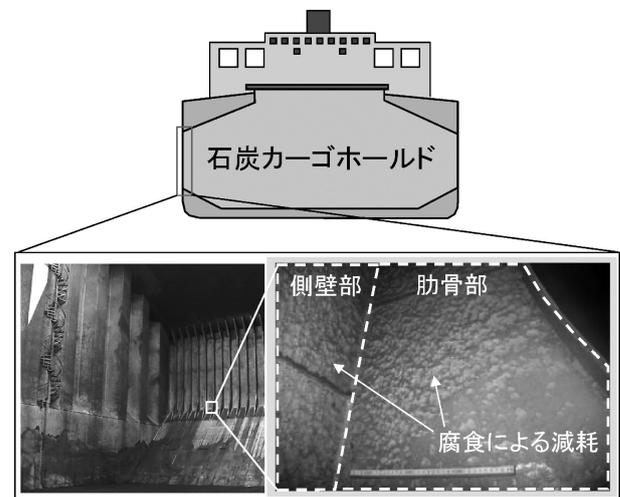


図1 石炭運搬船カーゴホールド内の腐食状況例。

なる。また、局所的には腐食減耗量が予備厚を上回って鋼板の交換が必要となるケースもあり、メンテナンスコストを増大させ、さらに腐食が広範囲にわたる場合には、船の寿命自体に影響を与えることになる。そのため、石炭運搬船カーゴホールドの更なる防食対策、すなわち、耐食鋼の開発が必要となった。

ここで、造船用耐食鋼としては、前述の荷油タンク用耐食鋼⁽²⁾やバラスタック用耐食鋼⁽³⁾が開発されているが、これらの腐食環境と石炭カーゴホールドの腐食環境は大きく異なるため、当該腐食環境に対応した開発が新規に必要であった。そこで、著者らは、鋼に微量の合金元素を添加することにより、石炭運搬船カーゴホールドの腐食減耗を抑制し、補修寿命を延長できる耐食鋼⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾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. 開発技術

一般に、鋼材表面に錆層が形成する使用環境で耐食性を向

* 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
 4)技術企画部；企画グループリーダー(理事)
 Development of Corrosion Resistant Steel for Coal Carrier;
 Hiroshi Ikeda, Kazuhiko Shiotani, Satoshi Igi, Naokazu Yamamura, Kazukuni Hase (JFE Steel Corporation)
 2017年11月15日受理[doi:10.2320/materia.57.117]

上させるには、鋼へ適切な合金元素を添加し、腐食に伴い溶出する合金元素の作用を活用することで、保護性の錆層を形成させる方法が用いられる⁽¹⁰⁾。すなわち、合金元素の作用により保護性の錆層を形成させる方法としては、錆層を細粒化し構造的に腐食因子の透過を抑制する⁽¹¹⁾、また、錆層のイオン選択透過性を変化させ電氣的に腐食性アニオンの透過を抑制する方法⁽¹²⁾などが知られる。しかしながら、これまで石炭船腐食環境での耐食性に及ぼす錆層の性状の影響は調査されていなかったため、本耐食鋼の開発では、石炭船の腐食環境で形成される錆層の性状と耐食性との関係について、実船調査や実験室腐食試験などにより調査した。その結果、石炭船の腐食環境で形成する主要錆種であるマグネタイト錆粒子の微細化によって、石炭由来の硫酸イオンの透過を抑制することが耐食性の向上に最も有効であることを発見した。そして、マグネタイト錆粒子の微細化にはCuなどの合金元素の添加が有効であることを発見した。さらに、最適な合金元素の組み合わせにより、造船用鋼としての十分な機械的特性を確保しつつ、超微細錆粒子の形成を達成した。

図2に後述する実船暴露材錆層断面の合金元素が濃化した錆層部分を透過型電子顕微鏡により観察した結果を示す。従来鋼では数十nmの粗大な錆粒子で構成されているが、耐食鋼の錆粒子は数nmと顕著に小さくなっている。この微細な錆粒子が緻密な錆層を形成する。合金元素による錆粒子の微細化は、錆粒子の結晶成長阻害が一因である。図3に錆層断

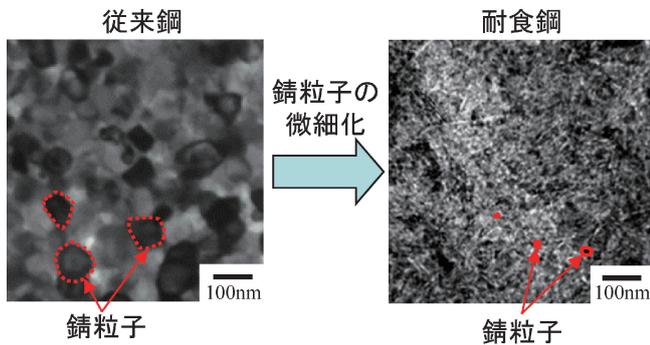


図2 従来鋼と耐食鋼の錆層における錆粒子サイズの比較(実船暴露10か月経過材、透過型電子顕微鏡観察結果)。

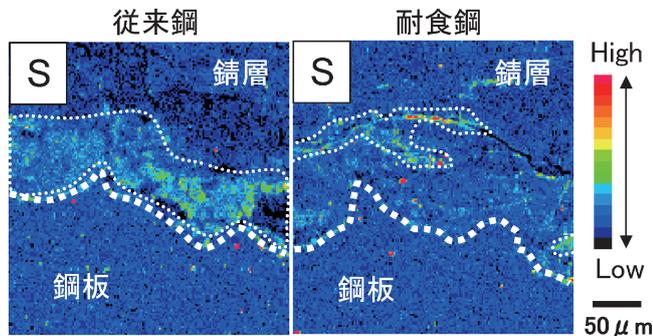


図3 従来鋼と耐食鋼の錆層-鋼板界面付近におけるS(硫黄)分布の比較(実船暴露試験22か月経過材、EPMA分析結果、錆層中の破線はS濃化域を示す)。

面におけるS(硫黄)の存在位置を示す。従来鋼では地鉄表面にSが多く存在しているのに対し、耐食鋼ではそれが顕著に少なく、耐食鋼では硫酸イオンの地鉄表面への近接を抑制していることが分かる。以上の観察結果に基づいた開発耐食鋼の耐食性発現機構を図4に示す。本耐食鋼は、腐食に伴い鋼材より溶出する合金元素の作用を活用することで鋼材表面に微細錆粒子で構成される緻密な保護性の錆層を形成させ、この錆層が石炭由来の硫酸イオンの鋼材表面への侵入をブロックすることで耐食性を発現する。

3. 開発鋼の特性

開発目標として、耐食性に関しては、鋼板の交換までの寿命を従来鋼に対し2倍以上に延長すること、機械的特性に関しては、板厚30mmでYP390E級を満足することを目標とした。表1に開発耐食鋼の化学成分例を示す。以下、耐食性能と機械的特性について述べる。

(1) 耐食性能

開発耐食鋼の実験室腐食試験により長期の寿命予測を行った⁽⁹⁾。実験室腐食試験では、所定の粒度へ揃えた石炭を試験片の上に積載し、恒温恒湿器により実船環境を模擬した乾湿のサイクルを与えた。試験期間は28, 56, 84, 168日間とし、n=3で実施した。そして、腐食試験後、試験片に生じた腐食深さをレーザ粗さ計により測定し、極値統計処理により所定の面積まで評価領域を拡張したときの最大腐食深さを求めた。寿命予測は、最大腐食深さが式(1)に従うと仮定し、前記168日までの試験結果を曲線近似することによって、それ以降の腐食挙動を外挿した。式(1)は、例えばIMO MSC.289(87)⁽¹³⁾に規定される原油タンク上甲板用の耐食性試験における25年後推定腐食損失量の算出方法に用いられている。

$$y = ax^b \quad (1)$$

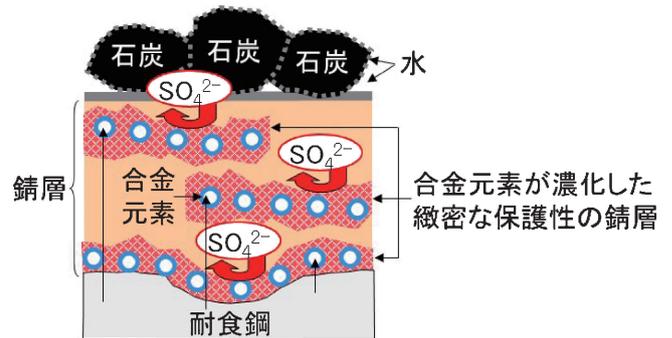


図4 開発耐食鋼の耐食性発現機構。

表1 開発耐食鋼の化学成分の例。

グレード	板厚 (mm)	化学成分(mass%)					
		C	Si	Mn	P	S	Ceq*
YP390E	30	0.070	0.20	1.46	0.006	0.0024	0.33

* Ceq=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15

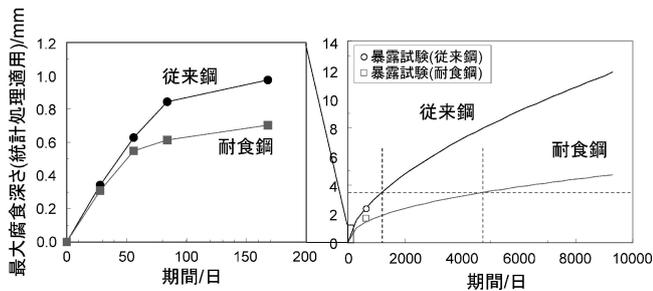


図5 実験室石炭積載腐食試験での耐食鋼の腐食挙動および実船暴露試験結果。

ここで、 y ：最大腐食深さ(mm)， x ：期間(日)， a, b ：定数
 図5に実験室での耐食鋼の石炭積載腐食試験結果を示す。168日時点で従来鋼に対し耐食鋼の最大腐食深さは約7割に抑制されており、その差は試験期間が長くなるにつれて拡大する傾向を確認した。さらに、長期の最大腐食深さを予測した結果、耐食鋼のある腐食深さに(3.5 mm)に達する時間は、従来鋼の2倍以上であり、このことから、本耐食鋼の腐食による鋼板の交換までの寿命は、従来鋼の2倍以上になることが期待できる。

本耐食鋼は、実船環境(石炭運搬船カーゴホールド内肋骨部)での2.5年間のテストピース暴露試験も実施されている。図5の右図内に暴露試験での最大腐食深さを併せて示す。なお、図5において、実船暴露試験の試験期間は、従来鋼の最大腐食深さを基準にすることで、実験室腐食試験の試験期間へ変換した。図5から、実験室での耐食鋼の最大腐食深さ抑制効果は実船のそれと一致し、このことより、実船環境においても、開発耐食鋼は実験室腐食試験と同様の寿命延長効果が期待できる。

(2) 機械的特性

表2に母材の機械的特性例を示す。表3にこの鋼板を用いて作製した溶接継手の機械的特性例を示す。溶接継手は大入熱溶接適用時の機械的特性を評価するため、入熱197 kJ/cmのエレクトログラスアーク溶接(EGW: Electro Gas Arc Welding)により作製した。本開発鋼は、母材・溶接継手ともに、YP390E級の造船用鋼として機械的特性を十分満足する。

4. 実用化状況および特許

本耐食鋼は、2014年に世界で初めて石炭運搬船カーゴホールド用に開発、実船適用され⁽⁷⁾、現在まで計8隻に採用されている。今後ますます当該分野の鋼材として適用が拡大

表2 開発鋼の母材機械的特性(引張試験, シャルピー衝撃試験)。

	降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)	伸び(%)	vE ₄₀ (J)
	474	524	20	341
規格(YP390E)	≥390	510-650	≥18	≥39

引張試験片の形状, 採取位置, 試験方向: NKU1号, 頂部, C方向
 シャルピー衝撃試験片の形状, 採取位置, 試験方向: NKU4号, 頂部表面1mm, L方向

表3 開発鋼の継手機械的特性(引張試験, シャルピー衝撃試験)。

板厚(mm)	溶接方法	溶接材料	引張強度(MPa)	ノッチ位置	vE ₂₀ (J)	
30	EGW, 入熱量: 197kJ/cm	(株)神戸製鋼所製 DW-S43G (1.6mmφ), KL-4	525, 527	表面 1mm	WM	89
					FL	214
					HAZ2mm	305
					HAZ5mm	316
				HAZ10mm	377	
				裏面 1mm	WM	109
					FL	141
HAZ2mm	262					
規格(YP390E)			≥510	-	≥39	

していくと考えられる。また、本技術に関連した特許も取得済み⁽¹⁴⁾である。なお、本開発における実船環境での暴露試験は、株式会社商船三井のご協力により行われたものであり、関係各位に深く感謝いたします。

文 献

- (1) 原田 晋：防錆管理，(2003)，89-100。
- (2) 古川直宏，鹿島和幸，伊藤 実，釣 之郎，阪下真司：ふえらむ，**20**(2015)，466-471。
- (3) 塩谷和彦，橋 俊一：日本船舶海洋工学会論文集，**24**(2016)，211-218。
- (4) 検査技術部：日本海事協会誌，**219**(1992)，79-117。
- (5) 小林佑規，田中義久，後藤英信，松岡一祥：日本造船学会論文集，**185**(1999)，221-232。
- (6) IACS: Common Structural Rules for Bulk Carriers, (2006)。
- (7) <http://www.jfe-steel.co.jp/release/2014/05/140515.html>
- (8) 池田博司，塩谷和彦：自動車技術，**68**(2014)，88-89。
- (9) H. Ikeda, K. Shiotani, M. Omoda, S. Tsuru and T. Komori: Proceedings of CORROSION 16, Paper No. 7425, (2016)。
- (10) 松島 巖：低合金耐食鋼，地人書館，(1995)，11。
- (11) T. Ishikawa, T. Yoshida, K. Kandori, T. Nakayama and S. Hara: Corrosion Science, **49**(2007)，1468-1477。
- (12) 竹村誠洋，藤田 栄，森田健治，佐藤 馨，酒井潤一：材料と環境，**49**(2000)，72-77。
- (13) IACS UI SC258, For Application of Regulation 3-11, Part A-1, Chapter II-1 of the SOLAS Convention (Corrosion Protection of Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers), adopted by Resolution MSC.289(87), The Performance Standard for Alternative Means of Corrosion Protection for Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers, (2013)。
- (14) 例えば，特許第5862323号。