

原油タンカーの性能基準に適合する

新しい耐食鋼



2004年に就航した、世界で初めて耐食鋼を採用したタンカー「TAKAMINE」。
積載重量約30 万t、全長333 m、幅60 m。
(写真提供: 日本郵船(株))

世界的なエネルギー需要の増加により、原油輸送量が増加している。原油タンカーの事故により原油が流出すると、大きな環境汚染を引き起こすことがある。国際海事機関(IMO)はさまざまな規制により、海の安全を確保しているが、流出事故の一因となるおそれのある原油タンカーのカーゴタンクの腐食について、新たな規制が加えられることになった。2010年に採択された新たな安全規制には、日本で開発されたタンカー用耐食鋼の適用が1つのオプションとして採用された。このようなタンカー用耐食鋼の開発の背景と経緯を中心に紹介する。

増加する原油の海上輸送とタンカー事故

エネルギー源としても工業原料としても重要な原油は、その多くが海上輸送により供給されている。米国エネルギー省エネルギー情報局のレポートによれば、2013年の世界の原油供給量は9,010 万BPD(BPD: Barrel Per Day)で、そのうち海上輸送は5,650 万BPDであり、供給量全体の63 %を占めている(図1)。原油供給量および海上輸送量とも、最近では増加傾向にある。

このように大量に海上輸送される原油だが、海上輸送量の増大にともない1960年代以降、原油タンカーの事故による大規模な原油流出事故が起き、環境への影響が問題になっていた(表1)。

国際海事機関(International Maritime Organization、以下、IMO)は、1989年のエクソン・バルディス号の事故を契機に、船舶の事故などによる海洋汚染を防止することを目的としたマルポール(MARPOL)条約を1992年に採択し、船殻を二重化するダブルハル(Double Hull)化を義務付けた。

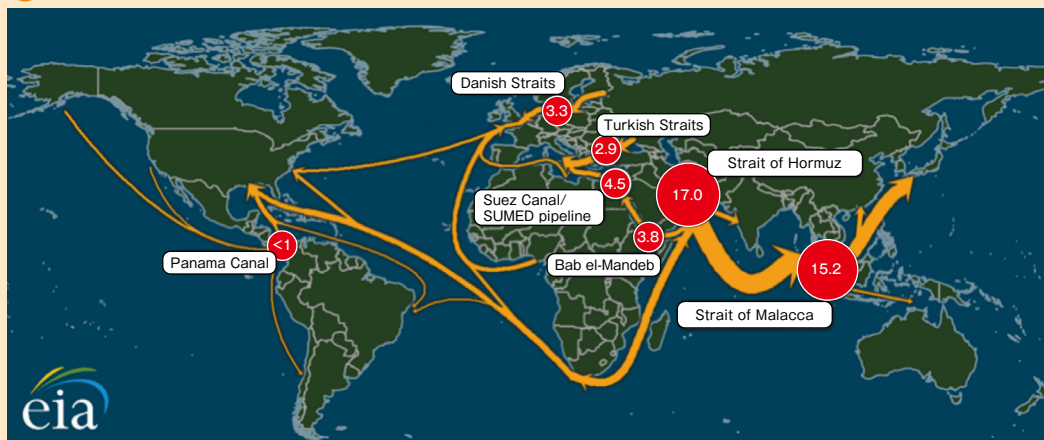
さらに新たな問題として、原油カーゴタンク内の腐食についても、1990年代後半から指摘され始めた。しかしながら、カーゴタンク内の腐食のメカニズムには不明な点が多く、特にタンク底部で発生する孔食については、発生のメカニズムはまったく不明であった。海水由来の特殊なバクテリアが原因であるとする説や、当時、普及し始めたTMCP(Thermo-Mechanical Controlled Process)鋼が原因であるとする説、ダブルハルとシングルハルの構造上の違いが原因であるとする説などもあったが、どれも推測の域を出ないものであった。

解明された特殊な環境と腐食メカニズム

日本造船研究協会では、1999年に第242研究部会(SR242)を設置し、3年間にわたって50隻以上の実船の調査を行った。これは、鉄鋼・造船・船主などの海事関係者が共同で調査・研究を行うもので、「オールジャパン」の体制で実施された。

ここでは、SR242の調査が明らかにした腐食環境と腐食メカ

● 原油の海上輸送量 (図1)



図中の数字は原油の海上輸送量 (million barrel per day)

2013年の世界の原油供給量全体のうち、約63 %が海上輸送によるものである。戦略的に重要な海上水路はチョークポイントと呼ばれ、海上輸送による原油の約84 %が、チョークポイントを通して輸送されている。また、ホルムズ海峡とマラッカ海峡を通過した原油量は、世界供給量全体の約35 %にも達する。

(出所: U.S. Energy Information Administration (EIA)、World oil transit chokepoints critical to global energy security, TODAY IN ENERGY (2014))

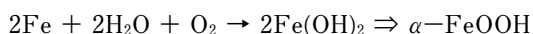
ニズムの概要を紹介する。なお、腐食原因の懸念が持たれていたTMCP鋼については、SR242の比較調査によって、従来鋼（軟鋼）と新造船に多く用いられていたTMCP鋼との腐食に相違が認められないことが明らかになっている。SR242による調査対象は全面腐食が発生している上甲板裏（カーゴタンクの天井部分）と孔食が発生しているタンク底部の2箇所である。

まず、上甲板裏の腐食環境と腐食メカニズムは以下のように考えられた。原油には可燃性の揮発成分が含まれ、タンカーで輸送する際には、揮発成分による火災を防止する必要がある。そのため、タンク上部の空間には船内ボイラーの排ガスを利用したイナートガス (inert gas) が満たされている。イナートガスには O_2 、 CO_2 、 SO_x 、 N_2 、 H_2O などが含まれるが、タンク上部の空間にはさらに、原油に由来する H_2S が加わることになる。 O_2 と H_2S が共存するガス環境での腐食は、これまでに想定されたことのない、特殊なガス環境であった。

また、上甲板では日中は強い日差しに照りつけられ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 近くまで温度が上昇し、夜は $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下まで冷却されるという温度変化が、航海中に繰り返される。このため、イナートガスで満たされた上甲板裏では、乾燥状態と結露状態が繰り返される (図2)。日中の乾燥状態では、 H_2S の酸化反応が進む。



夜間の結露状態では、鉄の酸化反応が進む。



このように上甲板裏では、2つの酸化反応が交互に進行した。そして鉄錆と固体硫黄が積層する構造を持った腐食生成物

● 主な大規模タンカー原油流出事故 (表1)

年	船名	流出量 (千 t)	事故内容*
1967	トリー・キャニオン	119	座礁
1972	シー・スター	120	衝突
1976	ウルキオラ	100	座礁
1977	ハワイアン・パトリオット	95	破損 (12歳)
1978	アモコ・カディス	223	座礁
1979	アトランティック・エンプレス	287	衝突
1979	インデペンデント	95	衝突
1983	カストロ・デ・ベルバー	252	火災
1988	オデッセイ	132	破損 (17歳)
1989	エクソン・バルディス	37	座礁
1991	ABTサマー	260	火災
1993	ブレア	85	座礁
1996	シー・エンプレス	72	座礁
1997	ナホトカ	6.2	破損 (26歳)
1999	エリカ	11	破損 (25歳)
2002	プレスティジ	10+α	破損 (26歳)

*破損には (船齢) を記載

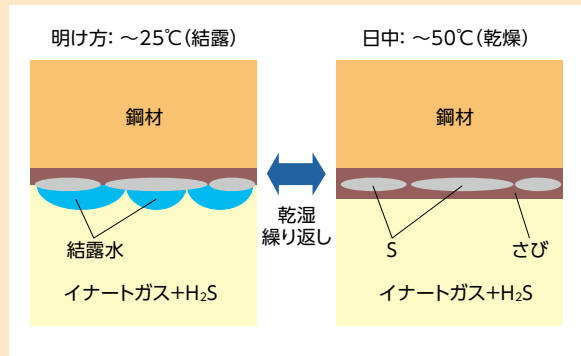
1989年に発生したエクソン・バルディス号の座礁による事故では、原油流出量は約37,000 tにすぎなかったが、甚大な環境破壊を引き起こした。この事故が船殻のダブルハル化の契機になるなど、IMOの安全基準は事故の教訓を反映して強化されてきた。

(小森務、「造船耐食鋼—タンカーカーゴタンク用耐食鋼—」、日本船舶海洋工学会誌KANRIN、第13号、2007年7月を基に作成)

が生成されていることが、調査の結果、明らかになった。

一方、カーゴタンク底部は異なる環境で、異なる腐食メカニズムが働いていることも明らかになった。カーゴタンク底部の厚板表面は、原油とスラッジで構成される「オイルコート」と呼ばれる

● 上甲板裏での腐食メカニズムの模式図(図2)



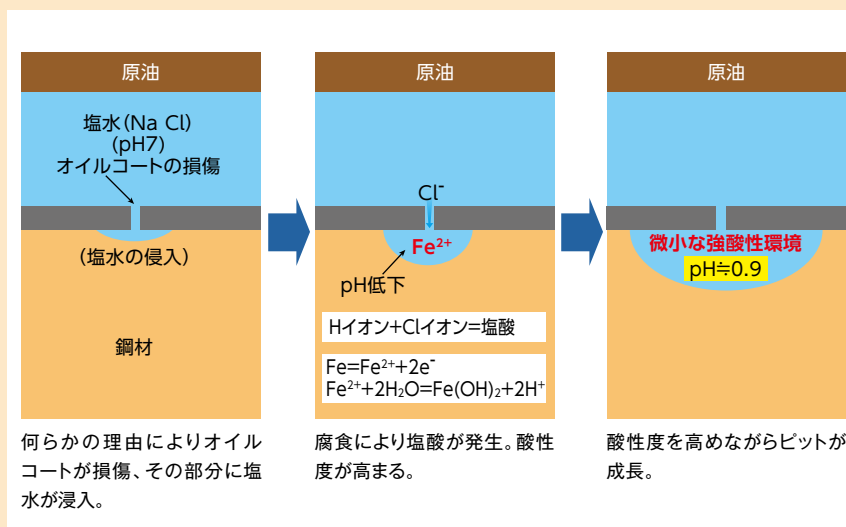
気温が最も下がる明け方は上甲板裏に結露水が発生し、 H_2S が溶けこむことにより酸性環境が形成される。日中は乾燥状態になり、 H_2S の酸化反応が進む。

(小森務、「造船耐食鋼-タンカーカーゴタンク用耐食鋼-」、日本船舶海洋工学会誌KANRIN、第13号(2007)を基に作成)

絶縁性の高い皮膜で覆われている。その上に、原油に含まれていた水分が分離した塩水と重なり、さらにその上に原油層が続く構造になっている。この塩水には Cl^- や H_2S など、腐食の原因となる物質が含まれており、何らかの原因でオイルコートに損傷が生じると、損傷部と健全部で電池を形成し、損傷部で腐食が発生する。さらに腐食反応によって塩酸が生成され、酸性度が上昇するため、欠陥部での腐食は加速されることになる(図3)。

このようなメカニズムで発生したタンク底部の孔食は、大きなもので直径30 mm、深さ10 mmにおよぶものもある(図4)。

● カーゴタンク底部での腐食メカニズムの模式(図3)



カーゴタンクの底部には、原油からしみだした塩水層が存在している。何らかの原因でオイルコートに損傷が生じると、孔食が発生する。

(Nippon Steel Monthly (2011), vol. 210より)

防食のアプローチがノウハウの要

防食にはさまざまな方法があるが、腐食環境と腐食メカニズムが明らかになれば、材料分野からのアプローチも可能になる。タンカー用鋼材などに用いられる低合金鋼では、腐食環境に合わせて耐食性向上のアプローチが行われる。

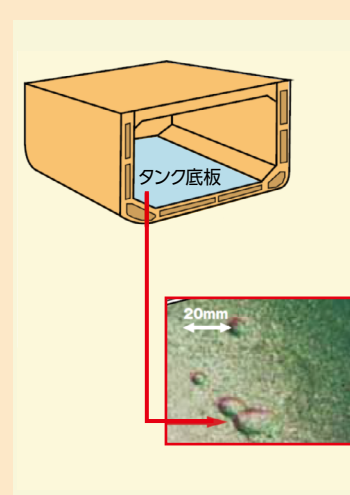
タンカー用耐食鋼の開発では、2つの基本的な考え方がある。1つめは、添加元素により耐食性を向上させることであり、2つめは、腐食を防止するのではなく、腐食速度を抑制することを目的とするという考え方である。

腐食速度を抑制するという考え方は、建築物外壁や内陸部の橋梁に用いられる建築用耐候性鋼の開発でも見られ、緻密な錆層を形成させることで、高い環境遮断性能を実現し、腐食の進行を抑制している(図5)。

一般的には、CrやNiを添加することで、耐食性を向上させることが可能であるが、溶接性が低下するという課題がある。また、高価な添加元素を使用することで、鋼材価格が上昇する。船舶用材料には、厳しい規格が定められており、規格内の構成元素で、必要な機械的強度や溶接性を満足させる必要がある。さらに、市場で十分な競争力を持つためには、高価な添加元素の使用を抑えることも重要になる。

これらの条件を満たす元素の組み合わせは、タンカー用耐食鋼の技術の要である。各鉄鋼メーカーは蓄積したノウハウを基に、タンカー用耐食鋼に最適な添加元素の組み合わせと組成を決定している。

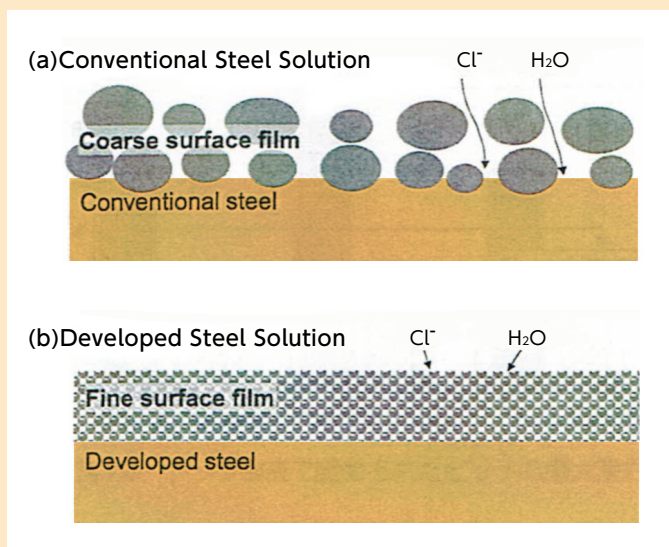
● カーゴタンク底部に発生した孔食(図4)



1度のドック入で、数千個の孔食が見つかる場合もある。

(Nippon Steel Monthly (2011), vol.210より)

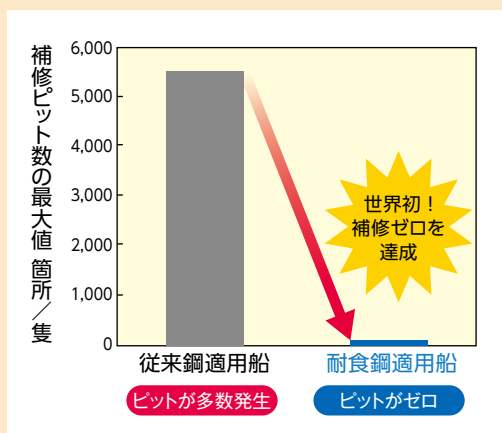
●タンカー用耐食鋼の腐食速度抑制の考え方の例(図5)



母材表面の酸化皮膜を緻密化することにより、腐食の原因物質の供給を抑え、腐食速度を抑制する。

（出所：阪下真司、川野晴弥、古川直宏、「原油タンク底板用耐食鋼」、溶接学会誌、第84巻（2015）第4号を基に作成）

●タンカー用耐食鋼による孔食発生抑制効果(図6)



軟鋼を使用した従来船では多数の孔食が発生していたが、世界で初めて耐食鋼を使用した「TAKAMINE」での孔食発生はゼロに抑えられた。従来、孔食の発生は、2年半に一度行われるドックでの点検の際に、目視により検査されており、発生箇所は再塗装や溶接肉盛などの補修が施されていた。耐食鋼を採用することにより、これらの補修コストが不要になる。

（Nippon Steel Monthly（2011）、vol.210より）

なお、添加元素により必要な耐食性を与えられた鋼材は、TMCPにより必要な機械的特性を持つように作りこまれる。

日本発の技術と規格が海の安全と環境を守る

SR242の終了後、鉄鋼各社は一斉にタンカー用耐食鋼の開発に着手し、それぞれ独自の製品を生み出していた。また、実船への試験導入を行い、実績を重ねていった。

国際的には、カーゴタンクの防食対策として塗装のみが有効な手段として検討されてきた。それを受けて、IMOでは、上甲板裏およびタンク底部への塗装義務化を検討していた。しかし、日本は耐食鋼などの新技術採用の門戸を開くべきだとの提案を行い、さらに、実船での試験を重ねてきた(図6)。それらの結果を示し、各国委員に対して、丁寧な説明を行った。その結果、2010年SOLAS条約(The international convention for the Safety Of Life At Sea、海上における人命の安全のための国際条約)の改訂に際し、2013年以降に建造される原油タンカーには、塗装と並んで耐食鋼の採用が承認されることになった。これは、国際標準の策定で日本の提案が採用された貴重な例であり、鉄鋼・造船・船主などが一丸となって取り組んだ結果といえる。

タンカー用耐食鋼を採用することによって、新造時の塗装コストの削減、定期補修時の再塗装や補修コストの削減が

期待できるだけでなく、塗装時に発生する揮発性有機化合物(VOC: Volatile Organic Compounds)の抑制効果も期待できる。

また、各社が開発したタンカー用耐食鋼は、日本海事協会をはじめとした各船級協会の認定を順次取得している状況にあり、カーゴタンク底部用耐食鋼については、新日鐵住金(株)「NSGP®-1」(2011年)、(株)神戸製鋼所「KPAC-1」(2013年)、JFEスチール(株)「JFE-SIP®-OT1」(2013年)、上甲板用耐食鋼については、新日鐵住金(株)「NSGP®-2」(2014年)が日本海事協会(ClassNK)より承認されている。

これらの鋼材は2010年の条約改訂を見越して開発され、実船での実証試験を行うことにより、実績を積み重ねてきたものである。タンカー用耐食鋼を使用したタンカーは、すでに20隻以上が就航し、新しいルールが適用された原油タンカーでも既に耐食鋼が使用されており、今後のますますの普及が期待されている。

日本のエネルギー確保に不可欠な原油タンカーには、耐食鋼をはじめとしたさまざまな鉄鋼製品と技術が用いられている。進化し続ける鉄鋼技術は、これからも日本のエネルギー戦略を支えていく。

●取材協力 (株)神戸製鋼所、JFEスチール(株)、新日鐵住金(株)
●文 石田亮一