

# タンカー原油タンク用耐食鋼「JFE-SIP-OT」

## Corrosion Resistant Steels for Inner Bottom Plates of Cargo Oil Tank

猪原 康人 INOHARA Yasuto JFE スチール スチール研究所 耐食・防食研究部 主任研究員(課長)  
西村 公宏 NISHIMURA Kimihiro JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(課長)  
中村 雅美 NAKAMURA Masayoshi JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部厚板・鑄鍛室 主任部員(副課長)

### 要旨

タンカー原油タンク底板に発生する孔食の発生成長メカニズムを実験室的に再現して模擬孔食試験法を確立した。この試験法を用いて、孔食に対する添加元素の効果を明らかにし、孔食を大きく低減する耐孔食鋼「JFE-SIP-OT」を開発した。さらに、本開発鋼は、実船調査で発見したジンクプライマーの孔食低減効果を延長強化し、ジンクプライマーと併用することで要補修孔食数をなくすことが期待できる。

### Abstract:

A simulation test method for pitting corrosion was established to reproduce the pitting corrosion phenomenon on the inner bottom plate of COT (cargo oil tank). By using this test method, effects of alloy elements to pitting corrosion were disclosed. The low alloy corrosion resistant steel “JFE-SIP-OT” was developed where the number of pitting corrosion was greatly decreased. The pitting corrosion decrease effect of the zinc-primer discovered by investigating some actual tankers can be extended and strengthened by this corrosion resistant steel. When the corrosion resistant steel “JFE-SIP-OT” is applied to a tanker with the zinc-primer, the number of pitting corrosion for which the repair at the dock is necessary can be decreased to “0”.

## 1. はじめに

近年、船舶の安全性向上とライフサイクルコスト低減の観点から、船舶の種々の部位における腐食問題が注目を集めている。中でも、その進展速度の大きさからドックごとの検査および補修が必要となるタンカー原油タンク底板の孔食は、非常に重要な問題の一つである。写真1に実船調査で観察された孔食の外観を示す。2年半に最大深さ10 mm 強という速さで成長する孔食は、その発生個数が多い場合には、検査および補修に多大な労力とコストが必要となる。

1999 年より3年間に渡り行われた、(社)日本造船研究協会第242研究部会(SR242委員会)の研究では、タンカー原油タンク底板の孔食について、その実態と腐食環境の詳細調査を行った。そして、孔食は、オイルコート欠陥や塩水の局在化による環境の不均一化と酸化剤として働く鉄錆や固体S、FeSなどの存在が合わさって、発生、成長するという孔食発生メカニズムの推定を行った<sup>1,2)</sup>。

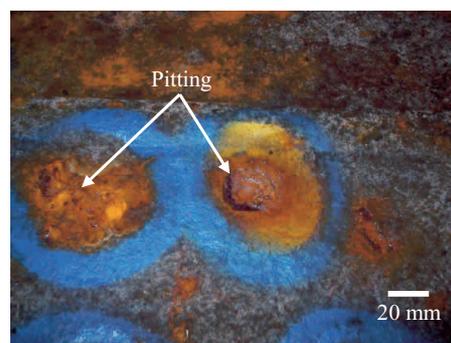


写真1 タンカー原油タンク底板に発生した孔食  
Photo 1 Pitting corrosion in cargo oil tank

この研究以降、各社で耐食鋼の開発が進められており<sup>5,6,7)</sup>、弊社でも、この孔食発生メカニズムを実験室的に再現してラボ孔食試験法を確立するとともに、その模擬環境において、添加元素と耐孔食性の関係を調べ、孔食の進展速度を大幅に低減する鋼材を開発した。さらに、本鋼材は、実船調査で発見したジンクプライマーの孔食低減効果を延長、強化する作用を有しており、ジンクプライマーと併用することでドック時に補修が必要となる孔食数をなくすことが期待できる。

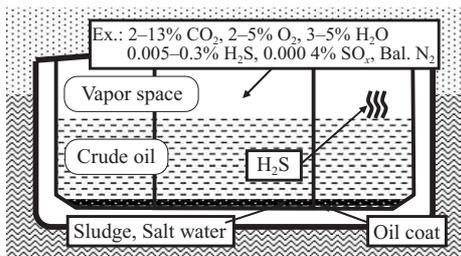


図1 原油タンカーの断面模式図  
Fig.1 Cross section of crude oil tanker

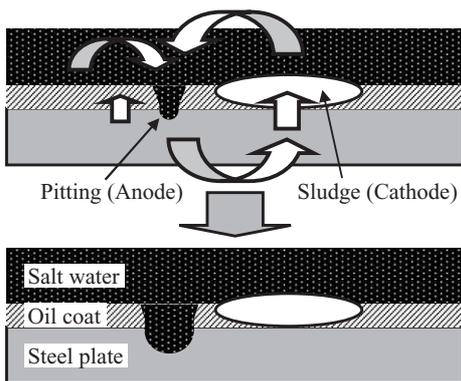


図2 孔食成長メカニズム  
Fig.2 Image of pitting corrosion growth

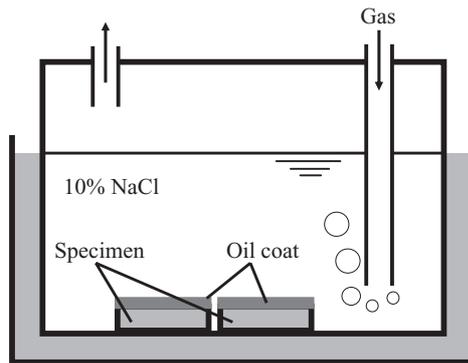


図3 模擬孔食試験法  
Fig.3 Simulated pitting corrosion test for COT

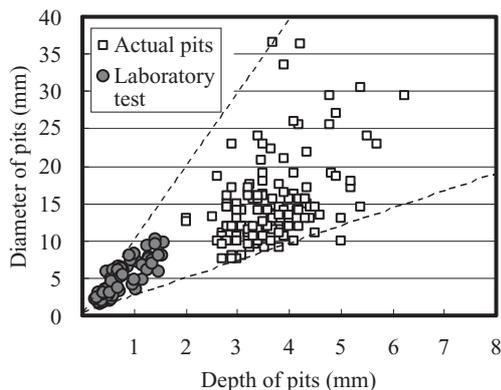


図4 孔食の形状比較  
Fig.4 Shape of pitting corrosion

## 2. 孔食の発生成長メカニズム

### 2.1 実船の腐食環境

図1に原油タンカーの断面模式図を示す。タンカー原油タンクの底板表面は、原油成分であるオイルコートに覆われるとともに、鉄錆を含むスラッジが堆積し、その上に原油から分離した高濃度塩水が滞留している。さらに、塩水には、防爆のために原油タンク内に導入されるイナートガス(CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>などを含む)の成分および原油中から発生するH<sub>2</sub>Sガスが溶け込んでいると推定される厳しい腐食環境である<sup>1,2)</sup>。

### 2.1 孔食の発生成長メカニズム

底板を覆う原油の重質成分であるオイルコートには防食性があるが、スラッジの堆積や定期的に行われる原油洗浄によって、オイルコートの一部に保護性の低い欠陥部分ができると、その部分に孔食が発生する。さらに、塩水環境において、オイルコート欠陥部分が局所的なアノード、スラッジや健全なオイルコートはカソードとなってマクロセルが形成され、孔食が成長する<sup>1,2)</sup>。

実船調査の結果、スラッジは、原油中に含まれる固形分のほか、原油タンク内で生成した鉄錆や硫黄が堆積しているものと推定された。図2に推定した孔食の発生および成長の模式図を示す。

## 3. 実環境模擬孔食試験法<sup>3)</sup>

図3に、実環境模擬孔食試験法の模式図を示す。溶液は10%NaCl溶液とし、H<sub>2</sub>Sガスを含む模擬イナートガスを飽和させた。また、二重セルによって、溶液温度は40℃に保持した。試験片は、被試験面以外をシールして保護するとともに、被試験面に実船から採取した原油残渣を塗布して、溶液中に上向きに浸漬した。被試験面中央には、原油残渣を塗布しない部分を設け、オイルコート欠陥部を模擬して孔食起点とした。28~36日間浸漬後に、表面に発生した孔食の形状を測定し、最大孔食深さで評価した。模擬孔食試験法によって再現した孔食は、図4に示すように、形状(平均径/深さ)比が、実船で観察される孔食形状と良い一致を示した。

## 4. 耐孔食鋼の開発とその特性<sup>3)</sup>

### 4.1 開発鋼の耐食性

前述したように、タンカー原油タンク底板の孔食は、マクロセルの形成によって発生成長する。また、孔食の成長にともない、孔食内部は酸性化する。そこで、耐孔食鋼の材料設計においては、不溶性酸化物の形成と表面錆の緻密

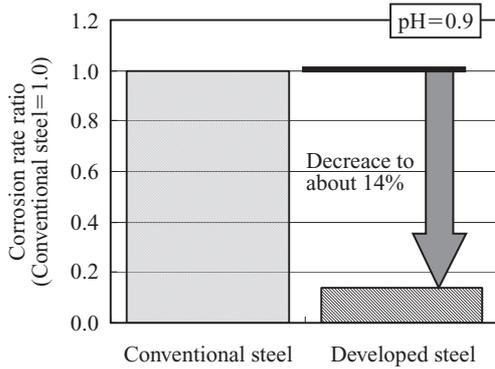


図5 従来鋼と開発鋼の耐塩酸性  
Fig.5 Resistance to hydrochloric acid

化によって、孔食の成長を抑制するとともに、耐酸性をも付与することを目指し、添加元素を選定した。

従来から広く用いられている一般造船用鋼（以下、従来鋼／conventional steel）および開発鋼を、孔食内部環境を模擬した塩酸性溶液浸漬試験で比較評価した結果を図5に示す。開発鋼の腐食速度は、従来鋼と比較して約14%と著しく減少し、優れた耐酸性が示された。

#### 4.2 ジンクプライマーの孔食低減効果<sup>4)</sup>と開発鋼の耐孔食性

原油タンカー（たとえば、日本と中近東間の原油輸送の主力であるVLCC）では、2.5年ごとのドック時に原油タンク底板の検査を行い、深さ4mm以上の孔食が確認された場合には、その補修が行なわれる。複数の原油タンカーの孔食発生状況を調査した結果、建造時にジンクプライマーを塗布した鋼板を使用した原油タンク底板では、建造時に黒皮ままの無塗装の鋼板を使用した原油タンク底板と比較して、孔食の発生および成長が大きく抑制されることが明らかとなった<sup>4)</sup>。就航2.5年目における最初のドック検査時の要補修孔食数は、無塗装仕様船と比較して、プライマー仕様船では約1/15～1/30であった。本耐食鋼の開発においては、ジンクプライマーの孔食低減効果を強化することも考慮し、種々の添加元素を検討している。

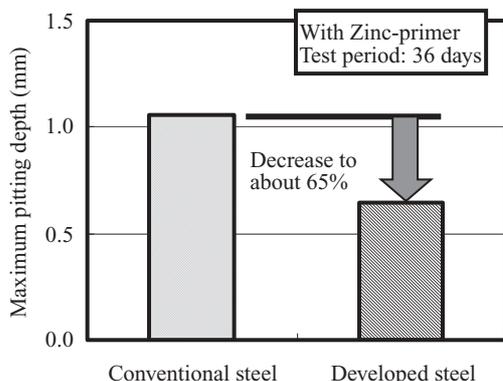


図6 従来鋼と開発鋼の耐孔食性  
Fig.6 Resistance to pitting corrosion

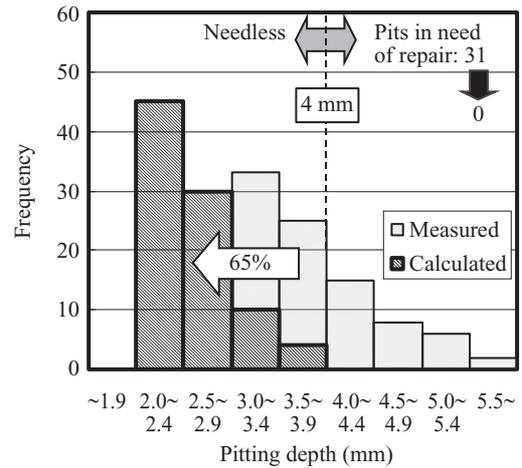


図7 実船の孔食深さ分布と開発鋼適用後の推定される孔食深さ分布  
Fig.7 Pitting depth distribution on actual tanker and the distribution after the developed steel adopted

従来鋼および開発鋼のプライマー塗布材を、前述した模擬孔食試験法によって評価した。結果を図6に示す。開発鋼の最大孔食深さは、従来鋼と比較して約65%に減少した。

この結果を、プライマー仕様船の実船調査において得られた孔食深さ分布に適用する。すなわち、実船で測定されたすべての孔食深さが65%に減少したとして、その分布を再計算すると、ジンクプライマーを塗布した開発鋼の要補修孔食数はなくなると試算される。実船で測定した孔食深さ分布および開発鋼適用後の試算結果を図7に示す。

#### 4.3 開発鋼の機械的特性

表1および表2に開発鋼（板厚：25mm）の母材特性および溶接継手部の機械的特性を示す。

表1 開発鋼の母材の機械的特性

Table 1 Mechanical properties of developed steel

| Grade           | YS (N/mm <sup>2</sup> ) | TS (N/mm <sup>2</sup> ) | EL (%) | Charpy V notch test at -20°C |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------|------------------------------|
|                 |                         |                         |        | Energy (J)                   |
| Developed steel | 425                     | 515                     | 24     | 297                          |
| IACS, 36D       | ≥355                    | 490/620                 | ≥21    | ≥34                          |

表2 開発鋼の溶接継手部の機械的特性

Table 2 Mechanical properties of welded joint of developed steel

| Grade   | TS (N/mm <sup>2</sup> ) | Charpy V notch test at 0°C |            |
|---|-------------------------|----------------------------|------------|
|   |                         | Notch position             | Energy (J) |
| Developed steel<br>(FCB welding method,<br>Heat input: 108 (kJ/cm)) | 549                     | WM                         | 102        |
|   |                         | FL                         | 94         |
|   |                         | HAZ 1 mm                   | 145        |
|   |                         | HAZ 3 mm                   | 237        |
|   |                         | HAZ 5 mm                   | 274        |
| IACS, 36D   | ≥490                    | —                          | ≥34        |

よび溶接継手特性を示す。溶接継手は、従来鋼用の溶接材料を用いて製作した。開発鋼は、従来鋼と同等の特性を有し、船舶用材料としての規格を満足するとともに、実船への適用においては、従来鋼と同様な溶接施工が可能である。

## 5. おわりに

- (1) タンカー原油タンク底板に発生する孔食を再現できる模擬孔食試験法を考案した。
- (2) 耐孔食性および耐酸性に優れた耐食鋼を開発した。開発鋼の塩酸中での耐酸性は、従来鋼の1/7以下である。
- (3) 開発鋼は、ジंकプライマーの孔食低減効果を延長強化する。従来鋼と比較して、最大孔食深さは約65%に減少し、実船適用時には、要補修孔食数をなくすことができるかと試算される。
- (4) 開発鋼は、船舶用の鋼材として、従来鋼と同等の機械的特性および施工性を有する。

実際のタンカー原油タンク底板の腐食状況を把握するために、(株)商船三井のご協力により、実船調査を行わせていただきました。深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 原油タンカーの新型コロージョン挙動の研究—研究概要総括書—, 2002-03, 日本造船研究協会, 第242研究部会.
- 2) 第242研究部会, 原油タンカーの新型コロージョン挙動の研究, 平成11, 12, 13年度報告書, 日本造船研究協会, 2000, 2001, 2002.
- 3) 猪原康人ら, タンカー原油タンク底板用耐食鋼の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2006, no. 3, p. 339.
- 4) 猪原康人ら, タンカー原油におけるジंकプライマーの孔食低減効果, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2006, no. 3, p. 337.
- 5) 井上幸一ほか, 原油タンカー/カーゴオイルタンク底板の孔食と新しい対策技術—孔食の進展が遅い耐孔食鋼板—, 日本造船学会誌, 2004-03, no. 878, p. 81.
- 6) 鹿島和幸ほか, タンカー原油タンク用耐食鋼の開発, 日本造船学会講演会論文集, 2005, no. 5, p. 131.
- 7) 今村弘樹ほか, タンカー原油タンク底板用耐食鋼の開発, 材料とプロセス, 2006, vol.19, no. 6, p. 1189.



猪原 康人



西村 公宏



中村 雅美