

# SR 242

SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

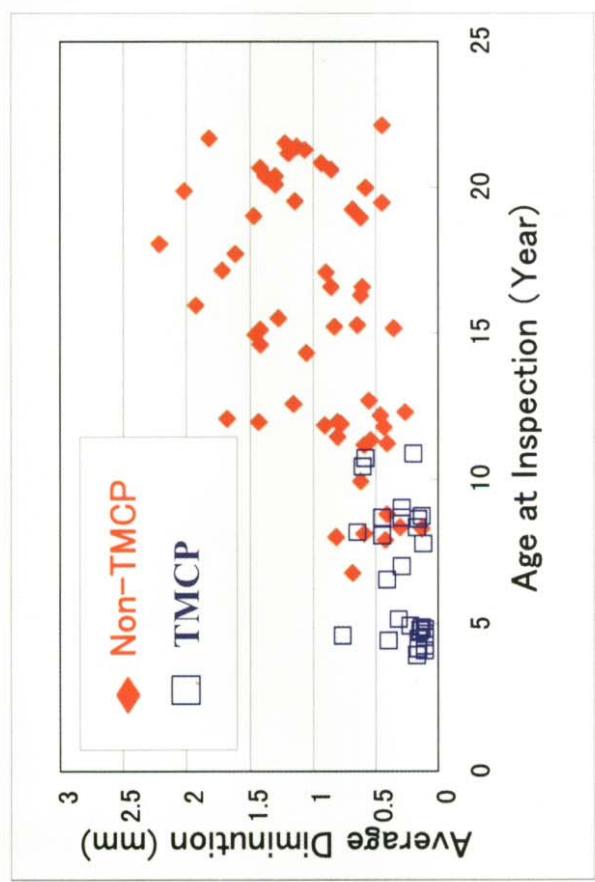
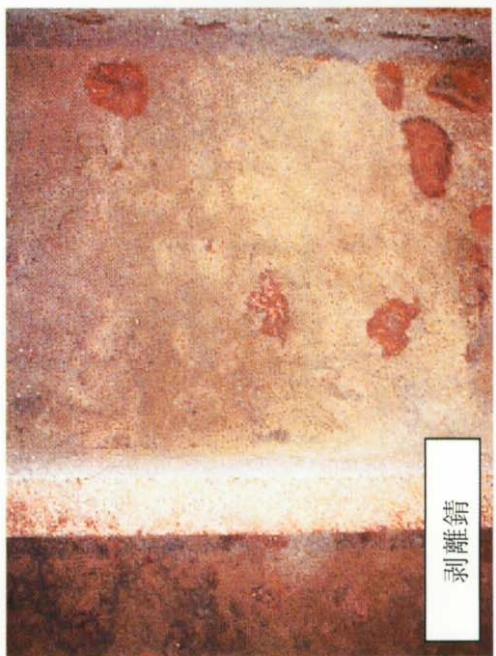
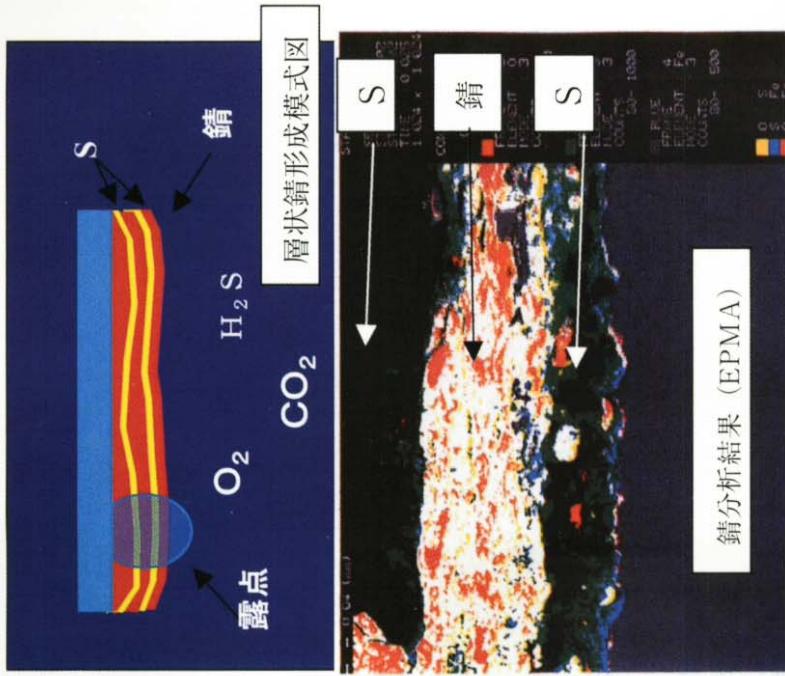
原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究

成 果 報 告 書

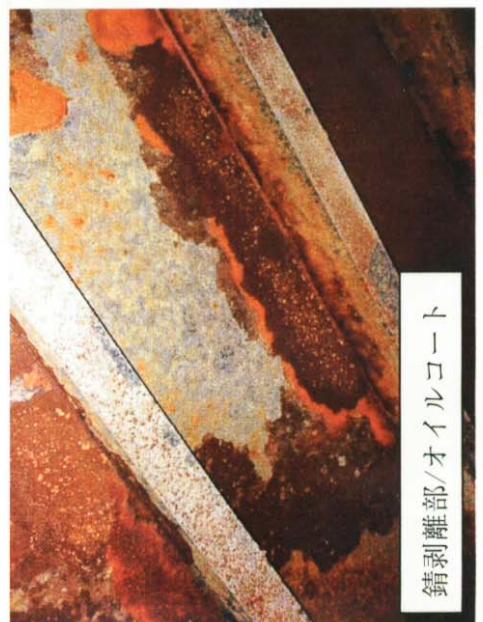
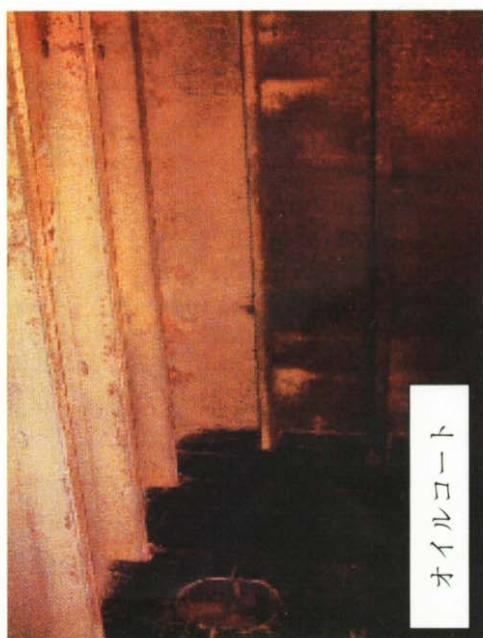
平成14年3月

社団  
法人 日本造船研究協会

## 原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究（全面腐食・上甲板）



船齢と平均板厚耗減量 (TMCP-MS の対比)

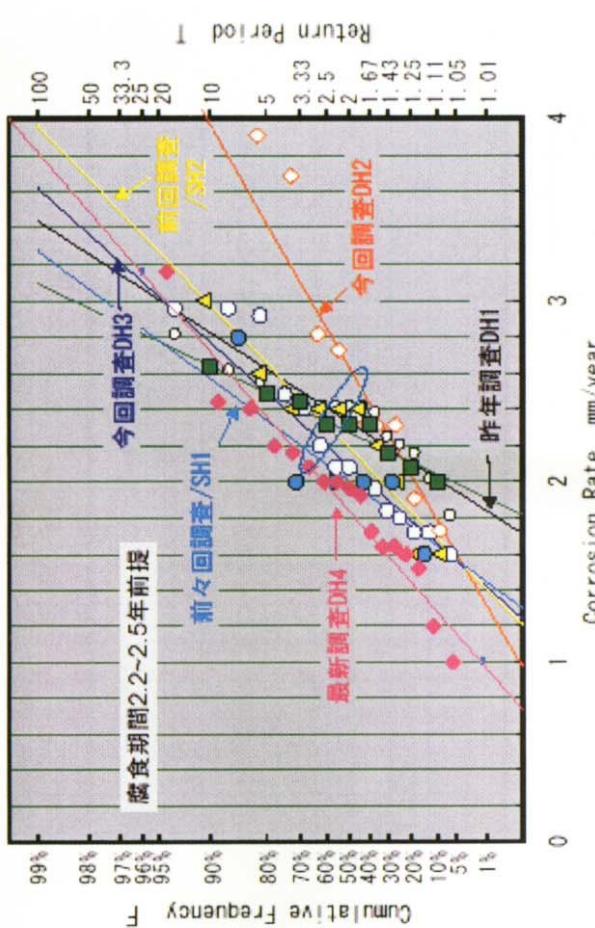
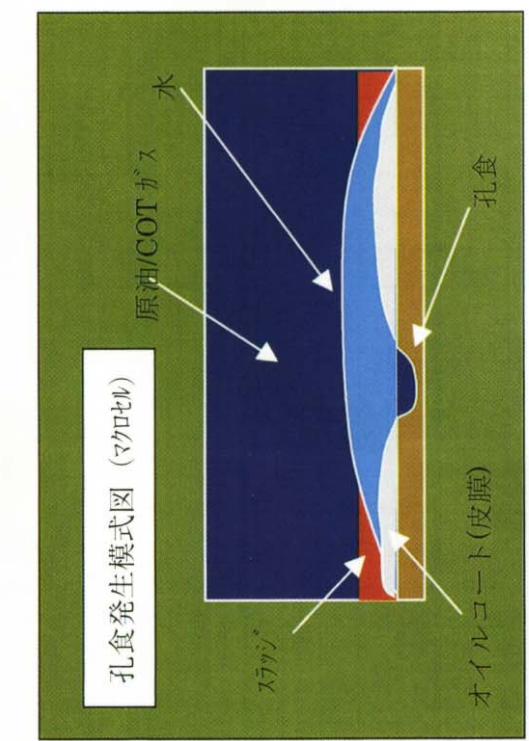


鉄剥離部/オイルコート

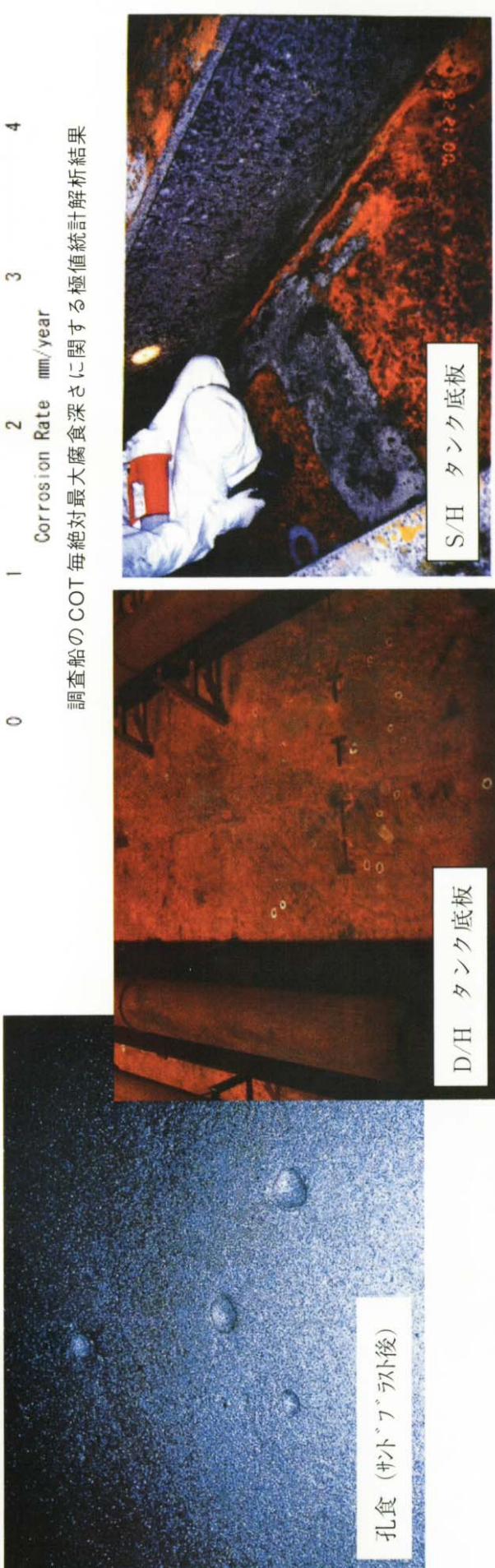
オイルコート

剥離鉄

## 原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究（孔食・タンク底板）



調査船のCOT毎絶対最大腐食深さに関する極値統計解析結果



# SR242 「原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究」

## 要 約

### Ship Research Panel 242 Study on Cargo Oil Tank Corrosion of Oil Tanker

#### Summary

Recently, excessive corrosion in uncoated plating of cargo oil tanks was reported in newbuilt crude oil tankers. Most of tanker owners and operators have been concerned about this accelerated corrosion, whose speed is higher than anticipated. In order to explicate causes and mechanism of the corrosion, Ship Research Panel 242 has carried out an investigation for 3 years.

Objectives of the investigation are the followings.

- 1) Confirmation of the corrosion status for both recently built and older VLCCs
- 2) Preparation of database on the corrosion and corrosion environment in cargo oil tank
- 3) Hypothesizing mechanisms of the corrosion by analyzing results of the above 1), 2)
- 4) Verification of the hypotheses by means of experiments in laboratories and on vessels
- 5) Study on countermeasures to prevent corrosion.

Noteworthy results of the investigation are the followings.

- 1) Vapor space corrosion
  - a) Mechanism of corrosion has been clarified and flaky rust scale has been reproduced by experiments.
  - b) There is no difference on corrosion between double hulls and single hull
  - c) There is no difference on corrosion speed between TMCP steel and MS steel
- 2) Tank top pitting corrosion
  - a) Mechanism of pitting initiation and growth has been almost clarified.
  - b) There is no difference on max. speed of pitting growth between double hulls and single hull, however density of pitting for double hulls is greater than single hull.
  - c) There is no difference on speed of pitting growth between TMCP steel and MS steel

## 1. 研究の目的

最近、国内外のオイルタンカーのオーナーやオペレーターの間で、原油タンク(COT)の腐食に対する関心が高まっている。特に、近年建造された VLCC と従来の VLCC の COT 内を比べ、その腐食速度の増大、腐食形態の変化があるとの論議がなされている。即ち、万一原油タンクに異常な腐食が生じた場合、原油の満洩、鋼材の早期な切り替え、構造部材の疲労寿命の低下に伴なう亀裂の発生、あるいは多量の腐食生成物発生による配管機器の破壊等の重大な危険が懸念されている。

一方、オイルタンカーの COT についての系統的な板厚計測データは乏しく、とりわけ若い船齢時点でのデータは皆無に等しい。また、過去に取得されたデータの整理・分析も不十分であり、特に孔食についてはきわめて記録が少なく、鋸の形態について調査したデータが殆どない状況である。さらに、COT の腐食について取り扱った研究や文献は国内外共に少なく、最近になりようやく研究が着手されつつある状況である。このように、原油タンクの腐食については、種々の原因の可能性が挙げられてきてはいるが未だ特定には至っていないのが実態である。

このような状況を鑑み、本研究は、COT の系統的な腐食データベースの構築、および腐食の原因とメカニズムの解明、それらに基づいた適切な防食対策の検討を研究目的とした。

## 2. 研究の目標

本事業では以下の 6 項目について、研究成果を得ることを目標にした。

- ①各種調査と分析による系統的な腐食データベース構築
- ②実船調査による COT 内腐食環境の把握
- ③原油タンク内の腐食発生状況の把握
- ④主要腐食発生メカニズムの仮説構築
- ⑤腐食メカニズムの検証と解明
- ⑥防食対策の検討と提案

## 3. 研究内容

### ①各種調査と分析による系統的な腐食データベース構築

#### a. 実船の腐食関連データの収集と整理

文献調査、原油タンカーの板厚計測データの収集と整理を実施した。また実船のタンク底板の孔食データを系統的に整理した。さらに、陸上貯油タンク等の腐食事例を調査した。

#### b. 腐食メカニズムの検討と解明

COT タンクの上甲板裏面とタンク底板を重点に、タンカー腐食の因子や因子相互の相関関係を検討した。それら腐食のメカニズムの仮説を構築するとともに、この仮説を検証するために必要な情報の入手に向けて②、③、⑥の調査・研究を実施した。

#### c. 防食対策の検討の研究

原油タンクに対する防食対策についての現在の実施例を調査し、これらの結果ならびに本研究成果にもとづいて、防食対策の基本的考え方を検討した。

## ②実船における腐食実態の把握の研究

### a. 上甲板裏面の腐食実態の調査

実船における上甲板裏面の腐食状況の調査、および板厚計測結果の解析を実施し腐食衰耗の実態を把握した。また腐食環境因子データの収集、腐食生成物等の採取・分析等を実施した。

### b. タンク底板の腐食実態の調査

実船におけるタンク底板の腐食状況について調査を行った。ピットマップの作成等により孔食の計測を実施するとともに、計測データの解析を行うことにより孔食等の実態と特徴等についての考察を行った。また、腐食環境因子データ、腐食生成物等の採取・分析等を行った。

### c. 隔壁構造等の腐食実態の把握

実船における隔壁構造等の垂直構造及びその付属構造についても腐食状況の外観調査等及びその結果の解析を実施した。

## ③腐食発生メカニズムの構築検証

### a. 実船における試験片暴露試験の研究

平成 11 年度に実船タンクに取り付けたサンプルを全て回収し、腐食減肉量ならびに腐食形態の調査と解析、腐食生成物の分析を実施した。この結果を上甲板裏面およびタンク底板の腐食発生メカニズムの仮説構築に活用した。

### b. 実験室試験による検証

上甲板裏面およびタンク底板の腐食メカニズムの仮説検証用データを取得するために実験室試験を実施し、腐食ガス成分、温度、海水などの腐食環境因子及び鋼材種類の影響を定量化とともにタンク内腐食の再現を行った。

### c. 実船における腐食モニタリングの実施

腐食環境と腐食進行の相関を把握するために、センサーを実船に搭載し、航海時にタンク内の環境と腐食変化を計測した。得られたデータを回収・解析することにより、上甲板の腐食メカニズムの仮説を検証した。

## 4. 得られた成果

### ①各種調査と分析による系統的な腐食データベース構築

- ・上甲板の全面腐食に対する平均板厚減肉量の定量化、ならびにタンク底板に生じる孔食進展速度の統計手法を用いた定量的な把握が可能になった。これにより腐食の進行速度の目安がつけられ、タンカーの安全運航への貢献が期待できる。さらに、船型と使用鋼材の腐食への影響評価が客観的に行え、COT の安全確保に有効な判断材料を用意することができた。

### ②実船における腐食実態の把握の研究

#### 上甲板裏面の腐食

- ・COT 内のガス成分は、従来の腐食化学では考えられなかった H<sub>2</sub>S と O<sub>2</sub> が共存するもので、タンク内は非常に厳しい環境下にある。
- ・上甲板に見られる腐食は全面腐食であり、形成される腐食生成物は、単体 S と酸化鉄層が交互に積層された形態を取る。その重量の約 60%は S 分であり、錆量は格段に少ない。

#### タンク底板の腐食

- ・タンク底板の腐食は孔食である。S/H では水滞留部または流水部に孔食が発生し易い傾向が見られる。D/H では S/H に比較して就航直後から孔食発生頻度は高い。
- ・鋼板表面に形成されるオイルコートの保護性は高く、一方オイルコートの状態が不均一な部分には孔食が多く発生する。
- ・孔食は入渠時を基点に発生し成長する。S/H と D/H の孔食進展挙動には差がなく、腐食の進展過程はほぼ同一と解釈される。

#### ③腐食発生メカニズムの構築検証／解明

##### 上甲板裏面の腐食

- ・上甲板裏面の腐食は、COT タンク内の腐食性ガス組成 (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>) と露点そして上甲板の昼夜の温度変動が主要な因子となる。腐食はこの環境因子の影響を強く受けて変化するが、MS と TMCP の鋼種の差、D/H と S/H の船型差による腐食速度の差違はない。

##### タンク底板の腐食

- ・タンク底板の孔食は、鋼材表面の保護皮膜に何らかの欠陥が引き起こされ、マイクロセルが形成されることにより発生、進展する。保護作用を発現する要素にオイルコート、ミルスケールなどが、欠陥を引き起こす因子には、滞留水、COW 照射、固体 S 等がある。オイルコートによる保護皮膜形成は船殻構造の影響を受け、S/H と D/H の構造差が孔食発生状況の差と関連する。
- ・孔食の進展速度については、S/H と D/H の間に差違は見られない。また、孔食の発生、進展に対しては、MS と TMCP の鋼種の差はない。

また、それぞれの腐食のメカニズムが明らかにされたことで、防食方法の方向性を示すことができた。

## 5. 成果の活用

本研究の結果を基に、下記のような活用が期待できる。

- (1) 原油タンク内での各種鋼材の腐食性能に関する系統的なデータベースが構築できた。その結果、腐食速度の評価を正しく行うことができ、タンカーの安全運航への大きな寄与が期待される。
- (2) TMCP 鋼が、腐食の観点からも問題なく活用できることを裏付けるデータが整備できた。よって、TMCP 鋼を活用する日本の造船、ひいては海運、鉄鋼および関連産業の国際競争力の維持、強化への寄与が期待できる。
- (3) D/H タンカーのカーゴタンクの腐食現象に対し、世界に先駆け正しい認識を得ることができた。この結果に基づき新しい効果的な防食方法が生まれる可能性がある。

## はしがき

本成果報告書は、日本財団の助成事業として、日本造船研究協会第242研究部会において、平成11年度から平成13年度の3ヵ年計画で実施した「原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究」の成果をとりまとめたものである。

### 第242研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	富田 康光(大阪大学)	小林 佑規(船舶技術研究所)
代表幹事	伊藤 隆章(住友重機械工業)(H11.4~H12.3)	熊野 厚(日本海事協会)
	阿部 孝三(住友重機械工業)(H12.4~H13.9)	桑田 敬司(日本船主協会)
	吉川 光昭(住友重機械工業)(H13.10~H14.3)	水津 壽雄(日本郵船)
委員	水流 徹(東京工業大学)	大藪 弘彦(商船三井)
	宇宿 行史(日本海事協会)	西岡 潔(新日本製鐵)
	千葉 廣(日本船主協会)	谷 三郎(日本鋼管)
	角 善晴(日本郵船)	染谷 良(住友金属工業)
	正林 和倫(NYK輸送技術研究所)	谷川 治(川崎製鉄)
	松永 久義(新日本製鐵)	鷗田 典繁(神戸製鋼所)
	今井 嗣郎(新日本製鐵)	塩飽 豊明(神戸製鋼所)
	正村 克身(日本鋼管)	安永 龍哉(神戸製鋼所)
	郡山 猛(川崎製鉄)	吉川 光昭(住友重機械工業)
	山根 康義(川崎製鉄)	斎藤 正洋(三菱重工業)
	浜中 孝道(神戸製鋼所)	清水 重雄(日立造船)
	中山 武典(神戸製鋼所)	西村 勝好(三井造船)
	阿部 孝三(住友重機械工業)	真鍋 英男(石川島播磨重工業)
	伊藤 圭司(住友重機械工業)	村上 彰男(川崎重工業)
	中園 博(日立造船)	秋山 章(ABS PACIFIC)
	楠 和憲(日立造船)	
	山田 雄三(石川島播磨重工業)	
	山本 聰(日本鋼管)	
	中村 真一(川崎重工業)	
	並川俊一郎(デットノルレスケベリタスエーエス)	

### 第242研究部会幹事会名簿

(敬称略、順不同)

主査	伊藤 隆章(住友重機械工業)(H11.4~H12.3)	
	阿部 孝三(住友重機械工業)(H12.4~H13.9)	
	吉川 光昭(住友重機械工業)(H13.10~H14.3)	
委員	熊野 厚(日本海事協会)	角 善晴(日本郵船)
	大藪 弘彦(商船三井)	今井 嗣郎(新日本製鐵)
	正村 克身(日本鋼管)	稻見 彰則(住友金属工業)

郡山	猛(川崎製鉄)	谷川	治(川崎製鉄)
中山	武典(神戸製鋼所)	安永	龍哉(神戸製鋼所)
阿部	孝三(住友重機械工業)	吉川	光昭(住友重機械工業)
末岡	英利(三菱重工業)	斎藤	正洋(三菱重工業)
中園	博(日立造船)	西村	勝好(三井造船)
山田	雄三(石川島播磨重工業)	真鍋	英男(石川島播磨重工業)
山本	聰(日本钢管)	村上	彰男(川崎重工業)
中村	真一(川崎重工業)		

## 第242研究部会WG1名簿

(敬称略、順不同)

主　　査	阿部 孝三(住友重機械工業)(H11.4～H12.3)	
	吉川 光昭(住友重機械工業)(H12.4～H14.3)	
委　　員	伊藤 隆章(住友重機械工業)	阿部 孝三(住友重機械工業)
	小林 佑規(船舶技術研究所)	山本 規雄(日本海事協会)
	角 善晴(日本郵船)	水津 壽雄(日本郵船)
	大藪 弘彦(商船三井)	今井 飼郎(新日本製鐵)
	加藤 謙治(新日本製鐵)	伊藤 公夫(新日本製鐵)
	正村 克身(日本钢管)	稻見 彰則(住友金属工業)
	幸 英昭(住友金属工業)	丹野 康雄(住友重機械工業)
	伊藤 圭司(住友重機械工業)	斎藤 正洋(三菱重工業)
	橋本 州史(三菱重工業)	北村 欧(三菱重工業)
	佐々木高幸(石川島播磨重工業)	中村 真一(川崎重工業)
	孝岡 祐吉(川崎重工業)	秋山 章(ABS PACIFIC)
	並川俊一郎(デットノルスクベリタスエーエス)	

## 第242研究部会WG2名簿

(敬称略、順不同)

主　　査	角 善晴(日本郵船)(H11.4～H12.7)	
	大藪 弘彦(商船三井)(H12.7～H14.3)	
委　　員	伊藤 隆章(住友重機械工業)	阿部 孝三(住友重機械工業)
	吉川 光昭(住友重機械工業)	伊賀 洋一(日本海事協会)
	角 善晴(日本郵船)	水津 壽雄(日本郵船)
	正林 和倫(NYK輸送技術研究所)	大藪 弘彦(商船三井)
	今井 飼郎(新日本製鐵)	山根 康義(川崎製鉄)
	中山 武典(神戸製鋼所)	安永 龍哉(神戸製鋼所)
	丹野 康雄(住友重機械工業)	伊藤 圭司(住友重機械工業)
	中園 博(日立造船)	西村 勝好(三井造船)
	山田 雄三(石川島播磨重工業)	真鍋 英男(石川島播磨重工業)
	山本 聰(日本钢管)	秋山 章(ABS PACIFIC)
	並川俊一郎(デットノルスクベリタスエーエス)	

## 第242研究部会WG3名簿

(敬称略、順不同)

主 委 員	正村 克身(日本鋼管) 伊藤 隆章(住友重機械工業) 吉川 光昭(住友重機械工業) 小林 佑規(船舶技術研究所) 松下 久雄(日本海事協会) 水津 壽雄(日本郵船) 今井 嗣郎(新日本製鐵) 幸 英昭(住友金属工業) 丹野 康雄(住友重機械工業) 斎藤 正洋(三菱重工業) 楠 和憲(日立造船) 佐々木高幸(石川島播磨重工業)	阿部 孝三(住友重機械工業) 水流 徹(東京工業大学) 熊野 厚(日本海事協会) 角 善晴(日本郵船) 大藪 弘彦(商船三井) 稻見 彰則(住友金属工業) 山根 康義(川崎製鉄) 伊藤 圭司(住友重機械工業) 清水 重雄(日立造船) 濱中 大祐(三井造船) 高島 顕(川崎重工業)
-------	--	--

## 討議参加者

(敬称略、順不同)

西方 篤(東京工業大学) 川野 始(海上技術安全研究所) 宇佐美陽生(日本海事協会) 立川靖二郎(商船三井) 石川 忠(新日本製鐵) 伊藤 実(新日本製鐵) 栗栖 孝雄(川崎製鉄) 川端 文丸(川崎製鉄) 平山 義明(三菱重工業) 佐藤 猛芳(日立造船) 神浦 真帆(日本鋼管) 上津原文雄(ABS PACIFIC) 大庭 亮(ABS PACIFIC) 石本 裕保(出光エンジニアリング) 芳賀 利廣(サンキマリンサービス) 桑名 功(サンキマリンサービス) 坂部 裕彦(国際エネルギー輸送) 中本 公平(日本ペイントマリン)	田中 義久(船舶技術研究所) 菅 勇人(日本海事協会) 近藤 良和(商船三井) 斎藤 隆穂(新日本製鐵) 皆川 昌紀(新日本製鐵) 松田 穢(日本鋼管) 元田 邦昭(川崎製鉄) 河田 和久(神戸製鋼所) 黒木 友博(日立造船) 足立 明弥(石川島播磨重工業) 北條 勝久(日本鋼管) 高木 民喜(ABS PACIFIC) 高橋 裕樹(デットノルスケベリタスエーエス) 小宮山和彦(カシワテック) 濱野 真志(サンキマリンサービス) 木村 伸之(エクセノヤマミズ) 石原 慎一(日本ペイントマリン)
--	--

事務局(日本造船研究協会)

宮澤 徹 武田 晴雄 海部 雅之

# SR242 「原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究」

1. 研究の目的	1
2. 研究の目標	2
3. 研究の内容	3
3.1 COT の環境調査	3
3.1.1 COT 内のガス成分分析結果	3
3.1.2 COT 内の付着物分析結果	3
3.1.3 輸入原油の動向	3
3.2 上甲板裏面の腐食に関する調査結果	4
3.2.1 実船調査による板厚計測結果	4
3.2.2 上甲板の腐食発生状況	5
3.2.3 実船における暴露試験結果	6
3.2.4 上甲板温度計測および腐食モニタリング結果	7
3.2.5 実験室実験による確認	8
3.2.6 上甲板の腐食発生メカニズム	8
3.3 タンク底板の腐食に関する調査結果	10
3.3.1 実船のタンク底板調査結果	10
3.3.2 タンク底板の孔食発生状況	10
3.3.3 タンク底板の滞留水	12
3.3.4 タンク底板の COT 内のオイルコート	12
3.3.5 タンク底板の温度	13
3.3.6 実船暴露試験	13
3.3.7 実験室実験	14
3.3.8 タンク底板の孔食発生メカニズム	16
3.4 腐食発生防止対策	17
4. 得られた成果	18
5. 最後に	20

## 1. 研究の目的

本研究は平成 11 年度から平成 13 年度の 3 カ年にわたり実施した。なお、平成 10 年度には本研究を開始するに当っての検討・審議が行われた。

近年、国内外の船主から、「従来の VLCC に比較して、近年建造された VLCC タンカーのカーゴオイルタンク（以下 COT : Cargo Oil Tank）に腐食が多く発生している」あるいは「COT の天井部（上甲板裏面）に発生する全面腐食やタンク底板の孔食が多い」と言った声が聞かれるようになった。

本委員会では、VLCC の COT 内に発生する腐食に対する疑問に対し、正しく正面から取り組み、その腐食発生原因を明確にすることで、原油タンカーの信頼性を高めることを目的として本研究を実施した。その際、従来の VLCC と最近建造される VLCC において、腐食環境として大きく異なる次の 2 点の影響を明らかにすることを目指した。

- ① 実船の腐食および腐食発生状況に及ぼすシングルハル（以下 S/H : Single Hull）とダブルハル（以下 D/H : Double Hull）の船型の影響
- ② 船体やタンクに使用されている軟鋼（以下 MS : Mild Steel）と TMCP（Thermo Mechanical Control Process）鋼の腐食に対する耐食性の差異。

具体的には、実船調査による腐食実態把握を中心にして、各種データの分析、文献調査等により補完しながら腐食メカニズムの仮説を構築し、その仮説を実船暴露試験や実船腐食モニタリング、さらには、実験室試験により検証することで腐食発生に及ぼす影響因子の究明ならびに発生メカニズムの解明を行った。

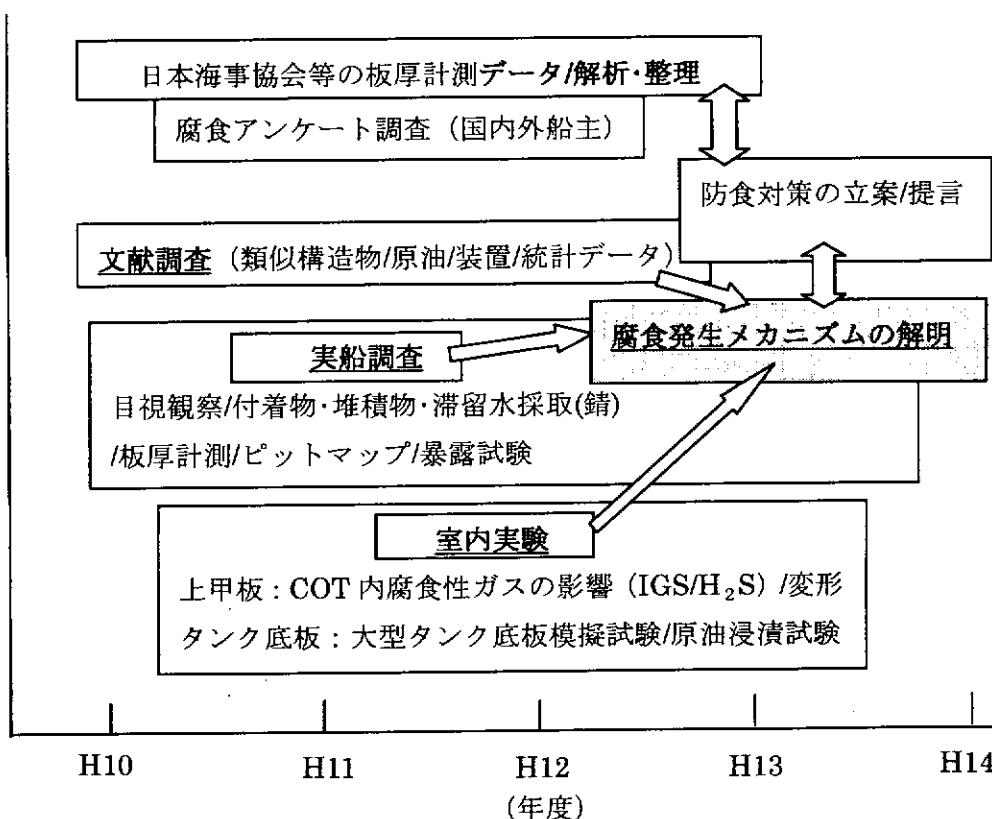


図 1 「原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究」の解明方法/工程

## 2. 研究の目標

船舶に限らず機械製品にとって、その損傷原因の多くは「疲労」と「腐食」である。また、両者は時間的ファクターがあり、すぐに結果が現れないという特徴がある。しかし、疲労に関してはかなりのデータの積み重ねや解析ツールがあり、材料、負荷応力、形状係数等がある程度明らかになれば、疲労対策の推論は可能である。

一方、腐食は、環境（ガス、積荷、温度）、材料表面状況、応力等の多因子が複雑に絡み合い、その発生要因、損傷進行程度等が 1 つの断面だけで説明が付かず、客観的に評価できる共通の尺度・方式も存在しないケースが多い。また、調査対象である VLCC 自体が巨大であるため調査・観察結果に対する信頼性、建造方法、運用方法の相違等にバラツキが多い。

そこで、本研究では次のような目標を立て、出来るだけ客観的なデータに基づいた結果の分析、評価を行うように努力した。

### ① 腐食量の客観的なデータによる評価

- ・過去の活用できるデータと我々の実測との客観的な比較による評価。
- ・COT 内での腐食の実態を海外にも伝え、批判・評価の授受。

### ② 現場に根ざした腐食現象の把握・評価

- ・類推でなく、実船（S/H および D/H）での板厚計測、ピットマップ等の腐食実態把握。各主要部位での実船暴露試験。
- ・COT 内の腐食環境の把握。温度計測、腐食モニタリング、採取物の分析。

### ③ 実験室実験による検証と理論化

- ・実船の腐食環境をベースとした腐食現象の解明と客観的数字的裏付け

### ④ 腐食発生メカニズムの解明

- ・①～③の結果を分析することによる腐食発生メカニズムの解明。

### ⑤ 腐食防止策の提案

- ・腐食発生メカニズムより見た防食手法の検討。

COT 内の腐食発生が、近年建造された VLCC タンカー自体の問題か否かを明らかにし、正しくその情報を活用することをその目標とした。

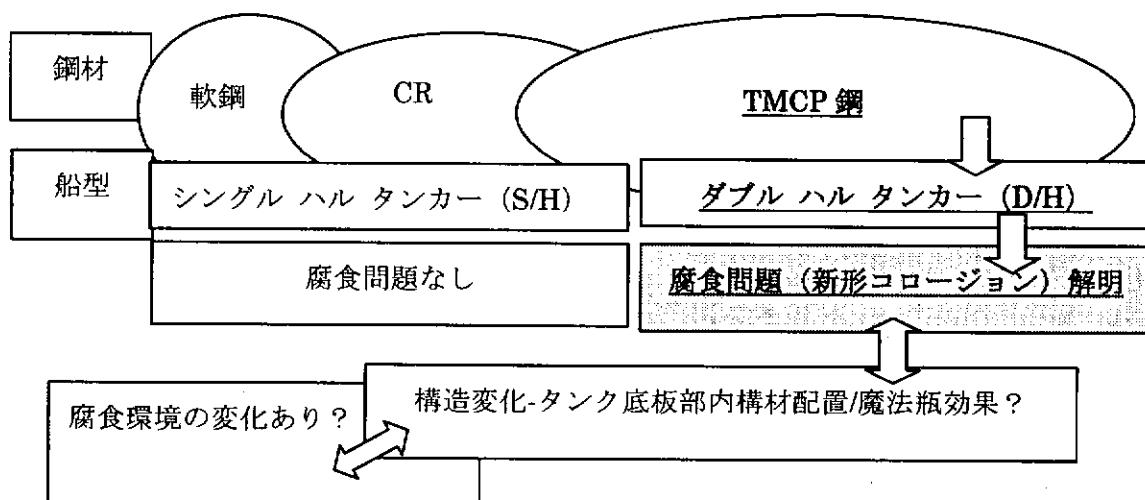


図 2 「原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究」の目的・目標

### 3. 研究の内容

#### 3.1 COT 内の環境調査

##### 3.1.1 COT 内のガス成分分析結果

材料の腐食問題の論議には、材料が曝されている環境（ガス成分、温度、圧力、流量等）を明確にする必要がある。しかし、COT 内ガス成分を示した資料、文献が無いため実測を行った。表 1 に分析結果を示すが、主要ガス成分として  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_x$  が存在する。また、各ガス濃度は原油の产地、原油積載量等によって変動することが分かった。

表 1 実船 COT ガススペースに存在するガス組成の詳細分析結果の一例

COT No.	3 S	4C	4 S	5C	5 S
原油	A	B	C	D	D (空)
積載量 (%)	93	89	92	31	0
$H_2S$ (vol.ppm)	2790	1330	498	817	550
$SO_x$ (vol.ppm)	1.3	3.9	1.6	2.7	0.7
$H_2O$ (vol.%)	4.9	3.9	5.3	2.5	3.2
$H_2$ (vol.%)	0.24	0.27	0.24	0.26	0.22
$O_2$ (vol.%)	1.65	2.52	1.80	3.88	4.48
$N_2$ (vol.%)	32.93	45.01	25.67	62.00	69.54
CO (vol.%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$CO_2$ (vol.%)	3.73	4.00	2.24	10.93	13.16
$CxHy$ (vol.%)	54.93	42.36	62.15	14.99	4.40

COT の防爆用 IGS(Inert Gas System : エンジン燃焼排気ガスをタンク内に導入)中には 5%程度の  $O_2$  が含まれている。また、 $H_2S$  は原油中の揮発性ガス成分と共に放出される。一般に、油井腐食環境では  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  の共存状態はあるが、ここに  $O_2$  が共存することは、従来の腐食化学では経験の無い環境となる。自然環境では  $H_2S$  と  $O_2$  が平衡論的に共存しないので、両者が共存する COT 内部は特異な腐食環境であるといえる。

##### 3.1.2 COT 内の付着物分析結果

就航前の COT では検出されなかった元素が、原油を搬送したタンカー (S/H, D/H 共に) では検出された。すなわち、タンク底板では  $Na^+$ ,  $Cl^-$  が、タンク内構造表面では S が多量に検出された。また上甲板裏面では S の凝縮が確認された。タンク底板の  $Na^+$ ,  $Cl^-$  は原油中の濃海水の析出であり、上部の S は同じく原油中の  $H_2S$  の影響を表わしている。

##### 3.1.3 輸入原油の動向

VLCC の積荷である原油がその腐食発生原因になる可能性があると考え、中東から日本に輸入されている原油の動向を調査 (1973~1999 年) した。国内景気により S 含有量の増減が多少 (1.2~1.5 wet.%) あるが、最近の原油の S 含有量が特に多いとは言い難い。

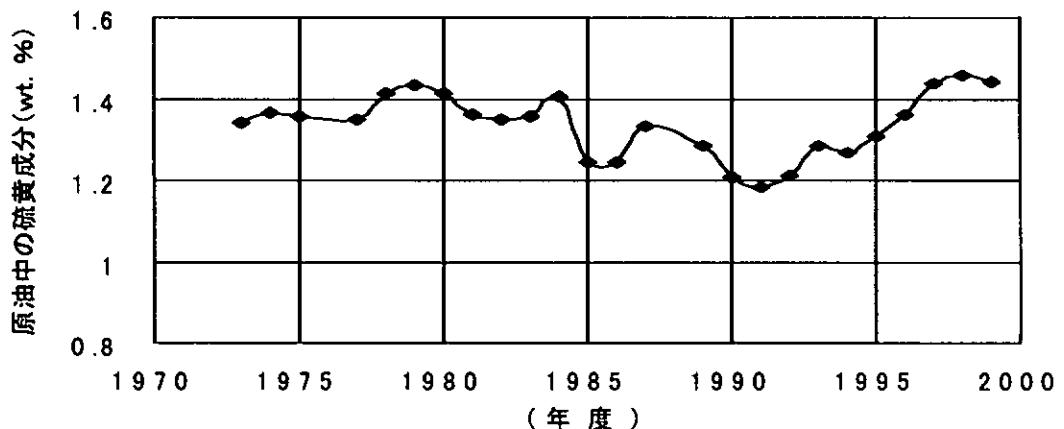


図3 日本に輸入された原油中に含まれている硫黄成分の比率推移

### 3.2 上甲板裏面の腐食に関する調査結果

#### 3.2.1 実船調査による板厚計測結果

比較的船齢の若い、TMCP 鋼を用いた S/H と D/HVLCC における上甲板の板厚計測結果を表 2 に示す。計測値には板厚公差、計測誤差等が存在するが、船型による大きな腐食速度の違いはなかった。また、最大腐食速度は 0.09mm/year であった。

表2 実船における上甲板の平均腐食速度の計測結果

船型	平均腐食速度(mm/year)	船齢 (year)
S/H	0.09	7.0
	0.06	5.0
D/H	0.06	5.0
	0.02	2.6
	0.04	5.0

一部の船主から、「航行時に上甲板に負荷される荷重がタンク毎に差があり、COT 位置で腐食進行速度が異なる」との声があった。そこで、S/H と D/H の各船型に対し、上甲板全域の板厚を実測した、その結果、タンク間での腐食速度の差はなかった。これは、日本海事協会（NK）殿が所有されている板厚計測データ（S/H 主体）とも良い一致を見ている。

NK 殿が所有している 52 隻の S/H タンカーの板厚計測データを、検査時船齢と平均減肉量の関係により整理した結果を図 4 に示す。その際、TMCP 鋼の市販時期と建造時の年代とを照合し、MS/CR 鋼と TMCP 鋼を表示した。図から分かるように、上甲板の減肉量には鋼種による差は無かった。なお、これらのプロット点は、ある船舶での同一箇所の船齢毎の計測ではないので、減肉量の経時変化を表わしているのではないことを念頭に置いて図を理解する必要がある。ただし、この結果からマクロ的な平均腐食速度は、検査時船齢 20 年で 2mm 以上になるケースは非常に少ないと言うことができる。

以上の結果から、上甲板の腐食速度は、船型（S/H と D/H）や鋼種（TMCP 鋼と MS/CR 鋼）で、差異は無いことが明らかにされた。

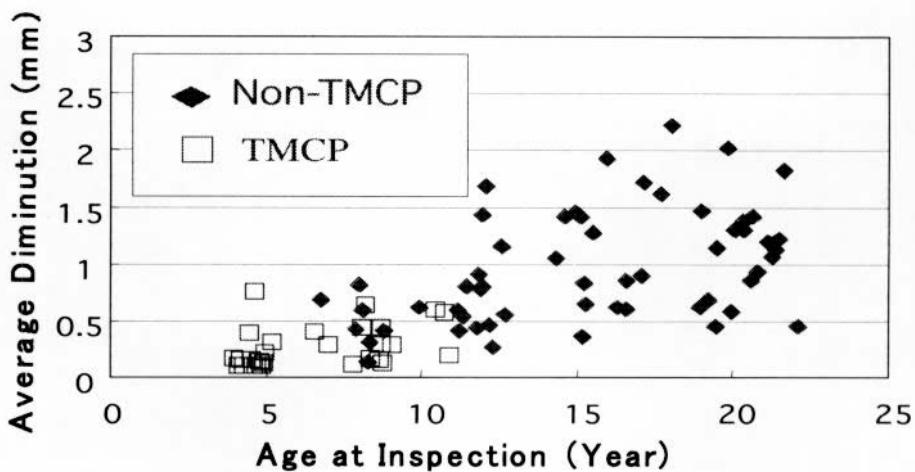


図4 上甲板裏面の腐食量に及ぼす鋼種、船型の影響

### 3.2.2 上甲板の腐食発生状況

実船調査時に撮影した上甲板裏面の外観を図5に示すが、上甲板裏面は、調査船毎で異なった様相を呈した。一般的に灰(銀白)色の物質を人為的に剥離させると黒色の原油分が見られる場合が多くた。また、剥離現象の有無により外観は異なり、剥離面の色も黒色から赤色まで様々な色であった。入渠時検査時にはCOT内は海水張りや海水洗浄されるために、外観から腐食を論じることは判断を誤る恐れがあり注意を要する。図5からわかるように、上甲板裏面では腐食生成物の剥離が頻繁に起り、落下した腐食性生物がタンク底板に層状に堆積した船もみられた。

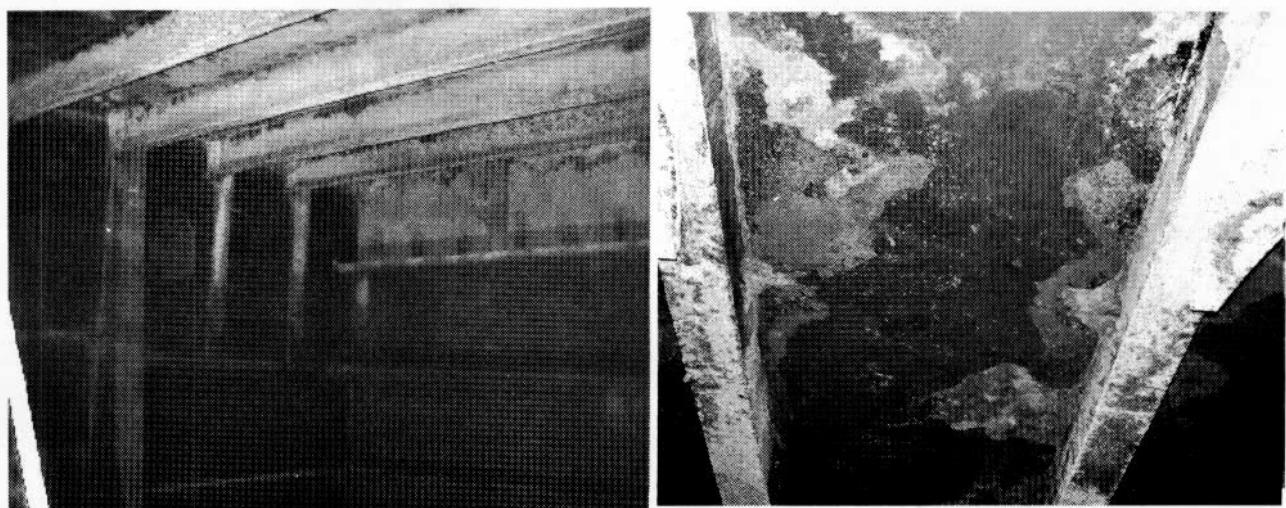


図5 実船上甲板裏面での典型的腐食発生状況（VLCC）

上甲板から剥離した腐食生成物の厚さは1mm程度であり、断面をEPMAで分析した典型的な結果を図6に示す。腐食生成物は、固体Sと酸化鉄が交互に積層された混合物であり、定量分析結果では固体Sが60wt%を占めることが判明した。当初、「剥離落下する錆の量が非常に多く、急速に腐食が進行している」との憶測がなされた。しかしながら、H<sub>2</sub>SとH<sub>2</sub>Oを含むガス環境条件下で、酸化鉄(FeOOH)表面が存在すると、鉄表面上に固体Sが析出する(H<sub>2</sub>Sガスの脱硫手段である「ボックス法」)ことは知られており、この固体Sの析出反応は鉄の腐食とは無関係であるので、上甲板裏面からの腐食生成物の落下量と腐食速度とは直接結びつかないことが明らかになった。

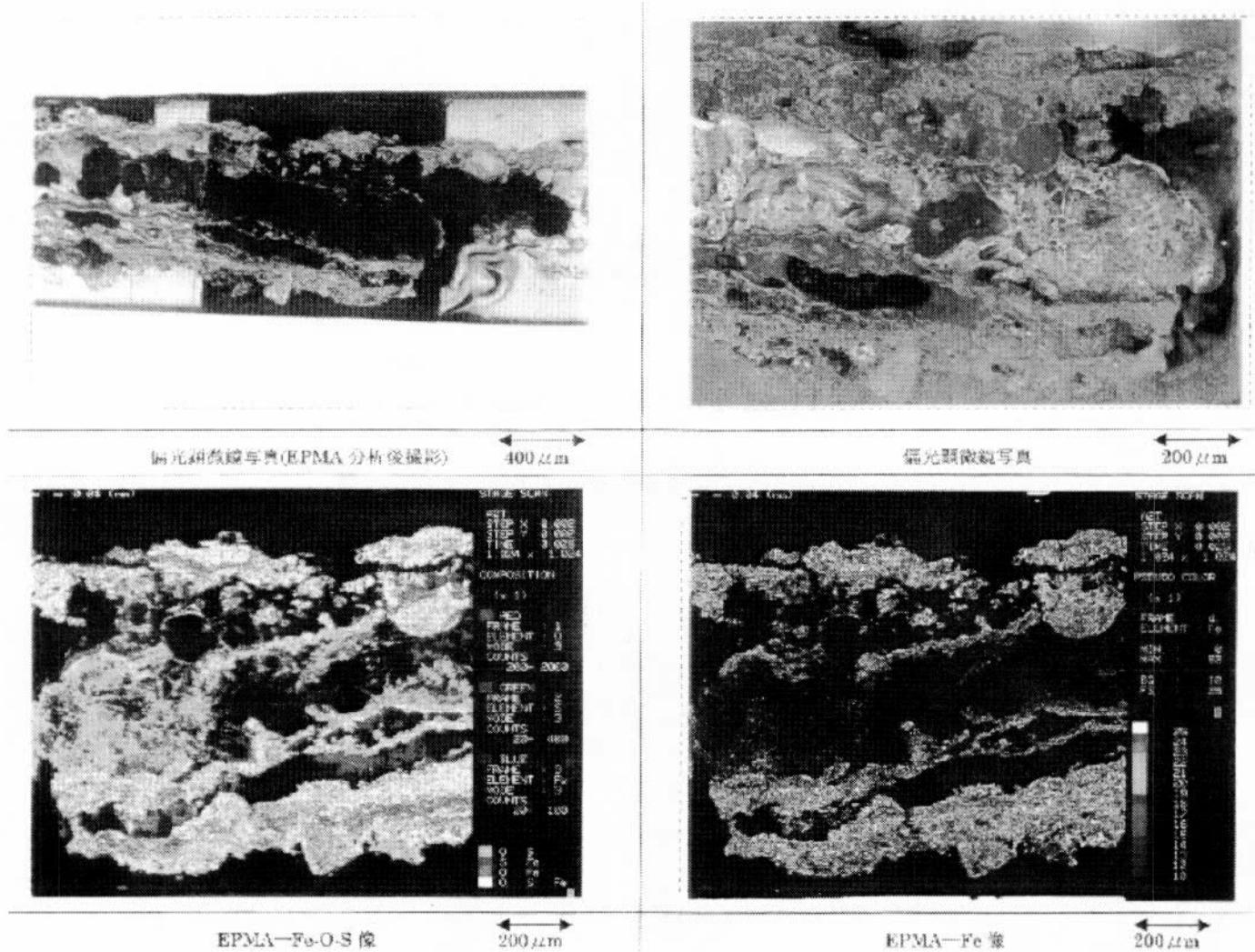


図 6 上甲板裏に生じた錆の断面 EPMA 分析結果の一例

### 3.2.3 実船における暴露試験結果

上甲板タンククリーニングホールを利用して、MS と TMCP 鋼を溶接した試験片を取り付け、0.5~2.0 カ間 COT で暴露することにより、腐食状況を調査し、減肉量計測等を行なった。

この結果から、腐食状況ならびに腐食の状態に鋼種の影響は無く、実船計測板厚結果と一致していることが確認された。また、錆厚さは暴露期間に無関係にはほぼ一定であることが判明した。図 7 に試験完了時の試験片の外観を示す。

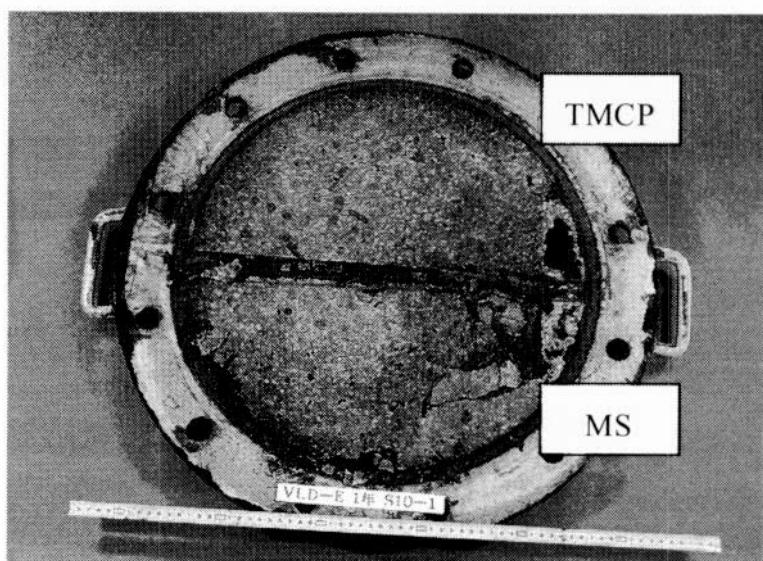


図 7 実船（上甲板裏面）暴露試験片

### 3.2.4 上甲板温度計測および腐食モニタリング結果

実船の上甲板の温度およびCOT内の温度計測結果の一例を図8に示す。本図は、日本から中近東にバラスト状態で出航し、原油を満載後、再び日本に帰港するまでの計測結果である。上甲板の最低温度は5~25°C、最高温度は35~60°Cであり、昼夜間での温度差が大きいことが分った。このことは、上甲板裏面で、COT内上部の空隙に存在する気体が鋼材表面で結露する可能性を示唆している。

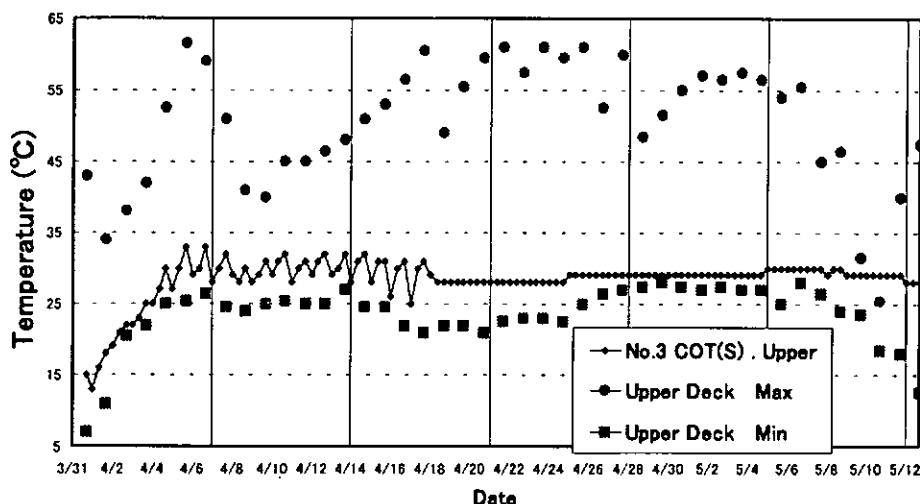


図8 上甲板鋼板温度計測結果

実船(D/H)の上甲板に取り付けた腐食モニタリング装置でも、甲板の温度は大幅に変化するが鋼材表面は完全に乾燥することなくウェットな状態にあり、腐食速度は温度の上昇と共に増加することが明らかとなった。その装置を用いた計測結果を図9に示す。

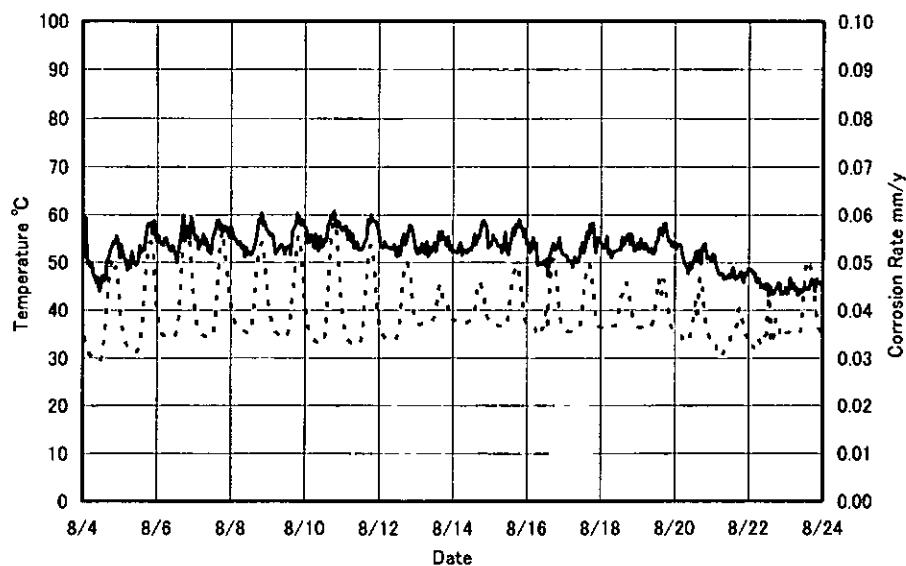


図9 上甲板での腐食モニタリング装置による計測結果

### 3.2.5 実験室実験による確認

タンク内のガス組成分析結果を基に試験の標準ガス成分を 5%O<sub>2</sub>-0.01%SO<sub>2</sub>-13%CO<sub>2</sub>と設定し、更に、原油から放出される H<sub>2</sub>S をこれに加えて実験室試験を行なった。H<sub>2</sub>S 濃度を変化させた場合の腐食速度への影響を図 10 に示す。

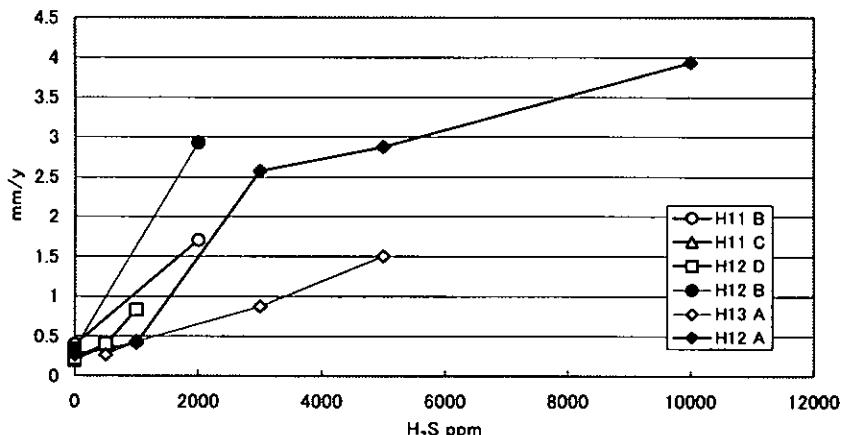


図 10 腐食に与える H<sub>2</sub>S の影響 (A,B,C,D は試験機関を示す)

H<sub>2</sub>S の存在は、いずれの実験でも腐食を増大させ、1000ppm を超えると腐食速度が大幅に増加する傾向がある。また、H<sub>2</sub>S は鉄を触媒として、O<sub>2</sub>との反応で単体 S を生じることが、実験室実験でも確認された。

実験室実験では TMCP 鋼と MS の間に腐食形態、腐食速度等の差異は認められず、上甲板裏面での腐食に両者の差は無いと結論付けられた。また、歪や鉄剥離の影響を調査した結果、0.05%までの歪であれば影響はほとんど無いこと、また、腐食生成物の剥離については、腐食生成物に腐食に対する保護性が無いので、剥離現象が腐食速度に大きな影響を及ぼすことはないことを確認した。

### 3.2.6 上甲板の腐食発生メカニズム

COT 内の上甲板裏面の腐食に関する各種要因をまとめて図 11 に示す。また上甲板裏面で生じる腐食反応および剥離現象のメカニズムの模式図を図 12 に示す。

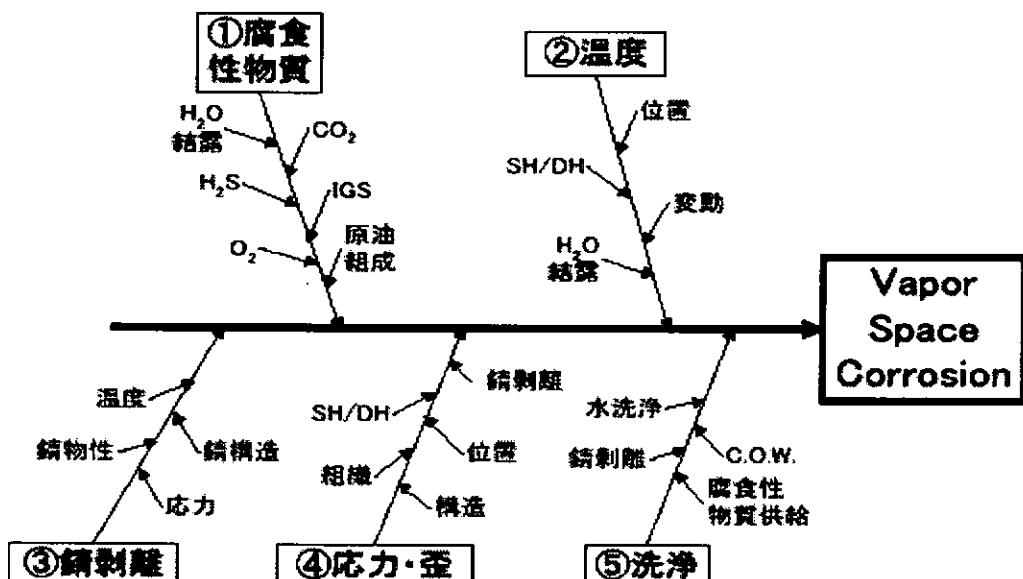


図 11 上甲板裏面の腐食発生の各種要因図

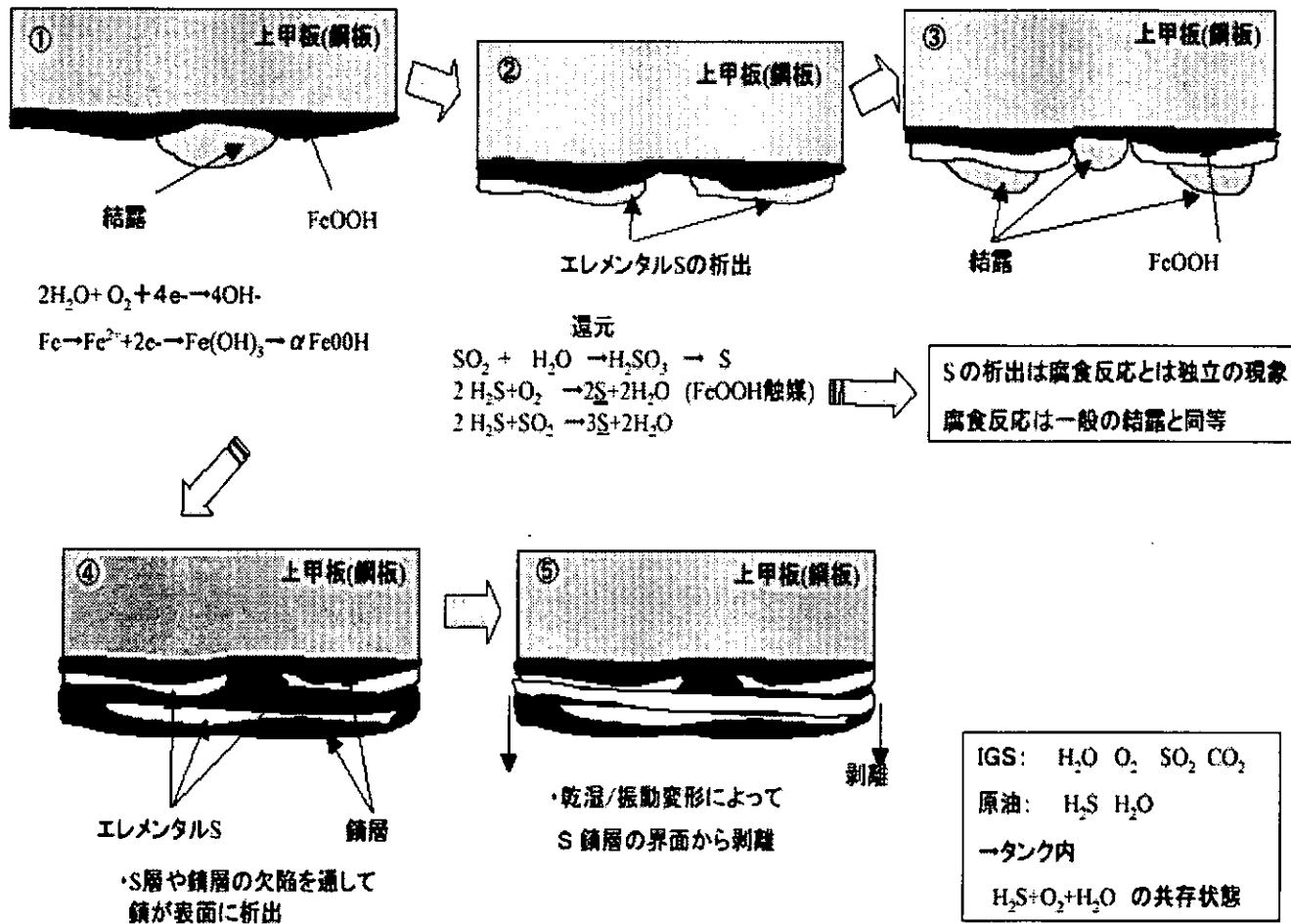


図 12 上甲板裏面の腐食反応（含む単体 S の析出-錆剥離機構）

$\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$  の共存状態は一般的に見られるが、COT 内は、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$  が共存するという自然界では存在し難い非常に厳しい環境下にある。この環境は従来から COT 内では存在していたが、腐食化学分野では今回の研究で見出された新事象である。また、昼夜の温度差によって、COT 内の上部に滞留するガス成分が上甲板裏面で結露現象を引き起こし、常にウェットな状態となっている。

このような  $\text{H}_2\text{S}$  と  $\text{O}_2$  が共存するガス環境条件下では、酸化鉄表面の触媒作用により鉄表面上に固体 S が析出するため、単体 S と鉄錆が層状に配列する腐食生成物を形成する。この固体 S の析出反応は鉄の腐食とは無関係であり、腐食生成物の量は腐食速度と関係しない。また、単体 S の層でこの腐食生成物は剥離、離脱を繰り返すが、この剥離現象が腐食速度の加速要因とはならない。

腐食速度に関して、鋼材 (MS,TMCP 鋼) の種類および船型 (S/H,D/H) の差は影響を及ぼさないことが、実船計測、室内実験、過去の計測データ等によって確認された。言換えると、TMCP 鋼で建造された D/H の腐食速度は、MS による S/H タンカーと同一の腐食速度であるといえる。

### 3.3 タンク底板の腐食に関する調査結果

#### 3.3.1 実船のタンク底板調査結果

実船調査結果によると、孔食は S/H と D/H のいずれでも存在するが、D/H の方が S/H と比較して、就航直後の発生個数が多いことが明らかとなった。一方、入渠時毎に作成したピットマップを詳細に比較すると、入渠時毎に図 13 のように一定深さ以上の孔食の分布が異なることがわかった。

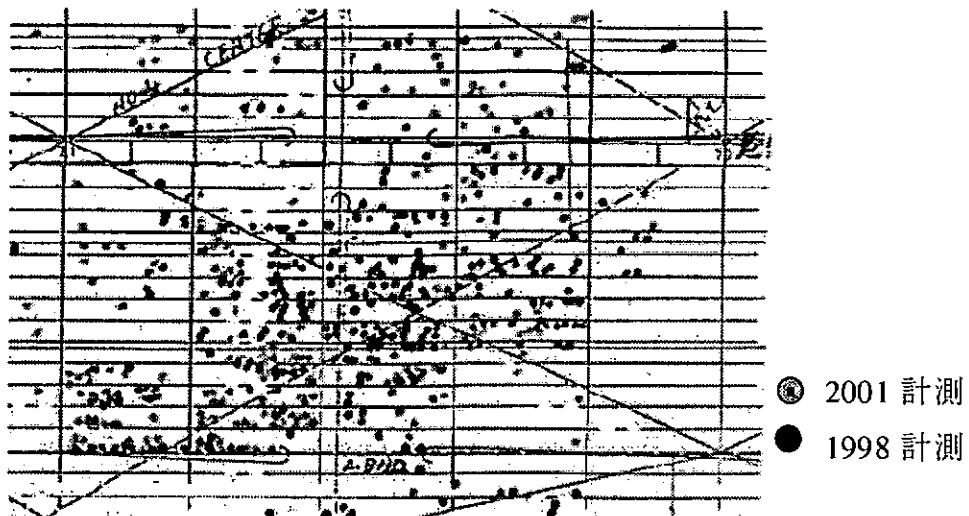


図 13 複数回検査時作成ピットマップでの孔食発生位置比較検討結果の一例(D/H)

図 13,14 に見られる如く、前回検査時に発見されタッチアップ塗装により補修が施された個所と異なる場所で、新たな孔食が発見された。このことから、孔食は、入渠時を起点に発生し成長するという仮説に基づいて、孔食の発生と成長が Dock to Dock 間で支配されると考え、極値統計法で調査船の COT 毎の最大腐食速度を整理した。その結果を図 15 に示す。

Dock to Dock 期間で見た場合、S/H と D/H では腐食速度の傾向に差異は無いことが判明した。この Dock to Dock での孔食最大腐食速度を極値統計にて分析する方法を、NK 殿所有のデータにも適用したところ、同様に S/H と D/H の間に差がないとの結果が得られた。

#### 3.3.2 タンク底板の孔食発生状況

S/H の孔食は、タンク底板のドレンホール間の水路、オイルコートが不完全な COW (Crude Oil Washing) シャドー境界部、ロンジ材フランジ面等で観察された。一方、D/H の孔食はタンク全底面発生し、場所の特定が難しいが、上部の構造物（ホリゾンタルガーダ端部、パイプライン等）からの液滴下個所に多く生じている場合もあった。代表的な孔食発生状況を図 16 に示す。これらの観察結果から、D/H と S/H に共通して、タンク底板に存在する水の滞留と鋼表面に形成されるオイルコートの状況が孔食発生に関係していることが想定された。

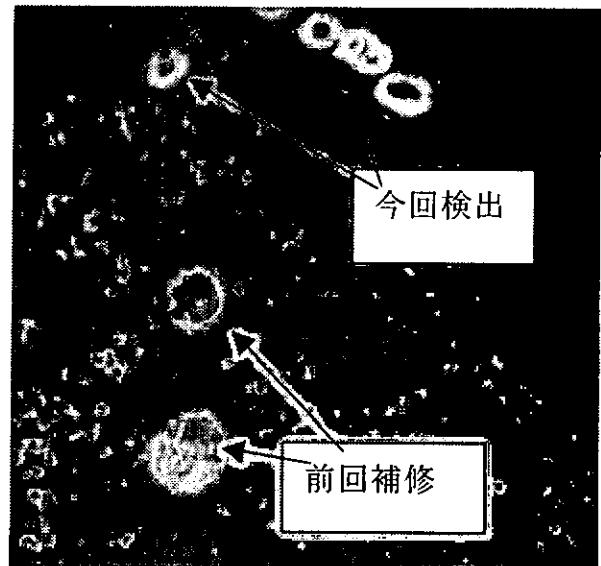


図 14 孔食発生位置の変化 (D/H)

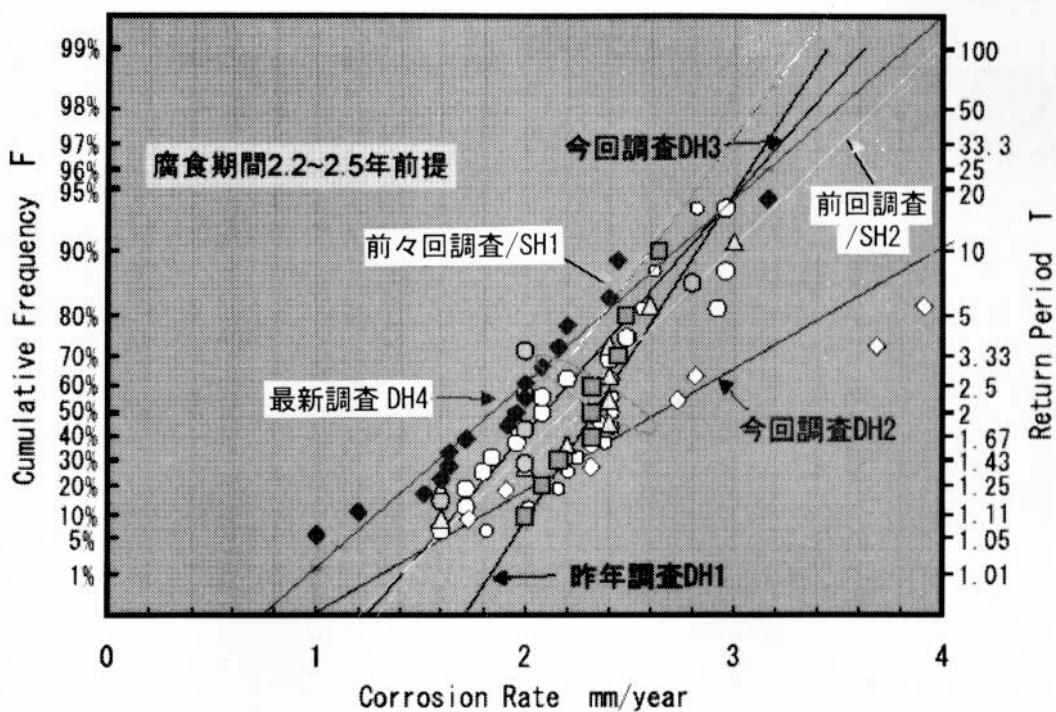
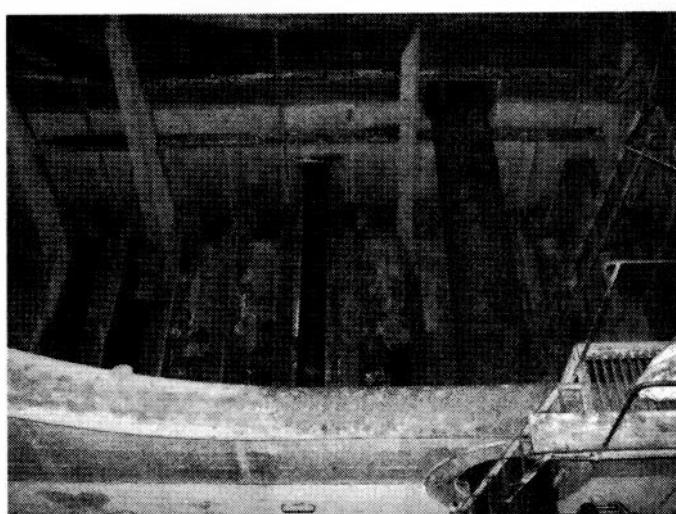


図 15 調査船の COT 每の最大孔食深さに関する極値統計解析結果



上部より  
タンク底板観察

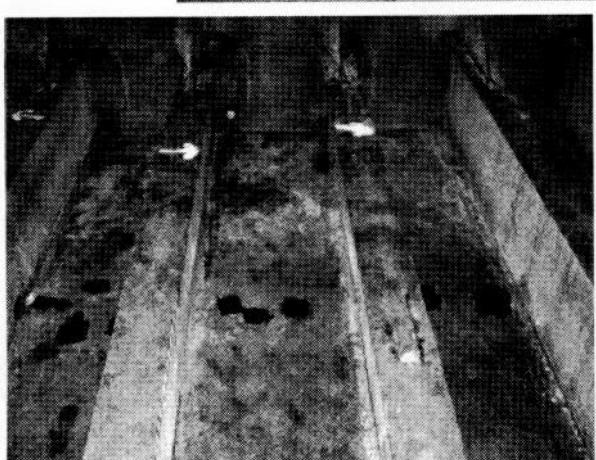


図 16-1 タンク底板での孔食発生状況（典型的な事例 S/H）

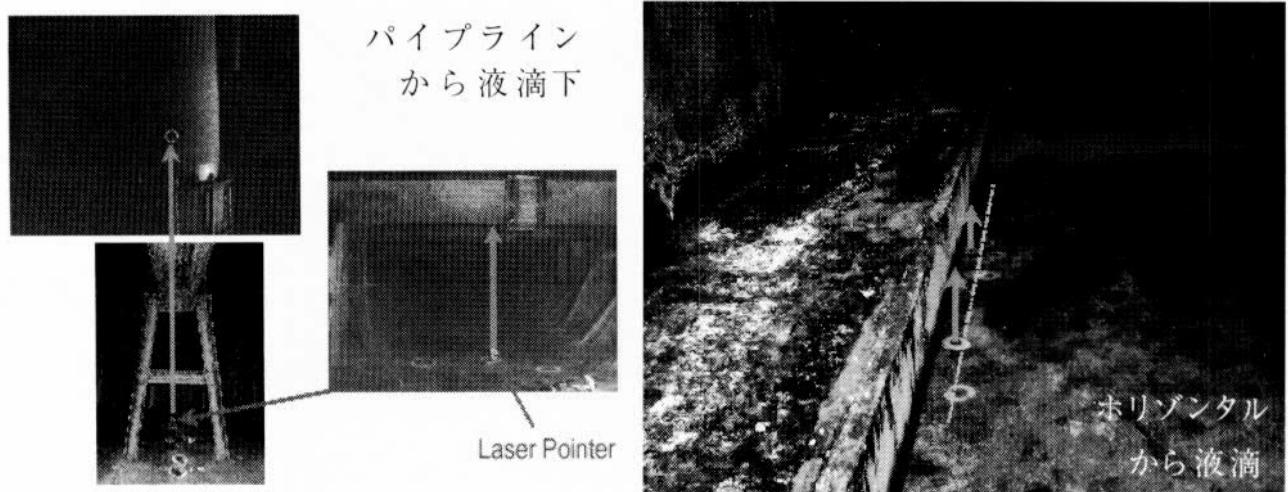


図 16-2 タンク底板での孔食発生状況（典型的な事例 D/H）

### 3.3.3 タンク底板の滞留水

孔食発生と成長には水の存在が不可欠で、底板に存在する水の性状が腐食現象に重要な影響を及ぼす。タンク底板上に数 cm の水層があることが原油積載航行時の実船で観察されたので、採取・分析を行なった。その滞留水の pH 値はほぼ 7 の中性であり、高濃度塩化物（8wt% as NaCl 程度）を含んでいることが判明した。これは、原油中の含有水分が搬送中にタンク底に析出したものと考えられる。バラスト航行時における水の存在は確認されていない。

表 3 原油積載時の COT 底板部滞留水の採取分析結果

タンク No.	Na	Total Fe	Fe <sup>3+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	pH	H <sub>2</sub> S
	13600	2	2	42500	14	<0.1	7.0	検出限以下
1S	40000	4.2	11	48000	1470	<0.1	7.15	
2P	40000	2.5	1	54000	1350	<0.1	7.50	

### 3.3.4 タンク底板の COT 内のオイルコート

COT 内面には白色/灰色の膜層が観察され、表面を軽く削り取った直下には黒色の油分層が出現した。これを原油分によるオイルコートと称し、そのイオン透過抵抗(遮蔽性)を RST® (Rust Stability Tester) を用いて測定した。その結果、健全なオイルコートではタールエポキシ塗装と同等の保護性を有することが判明した。RST 計測値の高い箇所ではオイルコートが厚く残り、RST の低い箇所では孔食が生じ易いことが確認された。また、オイルコートの遮蔽性は含水量の増加に伴って低下することも確かめられた。

オイルコート厚さは、COW の照射状態に影響を受けるものと想定し、D/H の COW マシーン直下から縦隔壁に向かってタンク底板の皮膜抵抗を計測した。結果を図 17 に示す。COW 直下では遮蔽性が低く、離れるに従って改善され、オイルコートの膜厚がマクロ的に変化した。また、各種内構部材や配管により生じる COW シャドー部ではオイルコートが厚く、タンク底板においては、オイルコートの状態が不均一であることが認識された。

S/H では図 16-1 のように、タンク底板に縦横に構造部材が配置されているが、D/H ではその部材

数が非常に少なく平坦であるため、COW シャドーが極端に少ない。この結果、S/H と D/H のタンク底板での COW 実施時のオイルコート生成と洗浄剥離の効果が大きく異なる。就航直後から D/H の孔食発生頻度が S/H に比べて高いのは、これが原因の 1 つと推定される。

オイルコートの分析結果では、油分以外に付着鋼板部に近い側に比較的高濃度の硫黄分が存在し、少量の酸化鉄分が均一に混在していることが判明した。また、底板部に堆積した可動性のスラッジから、油分や大量の鉄酸化物とともに比較的高濃度の硫黄分が検出された。なお、硫黄分の存在については後述するように局部腐食を加速する影響があることが判明した。

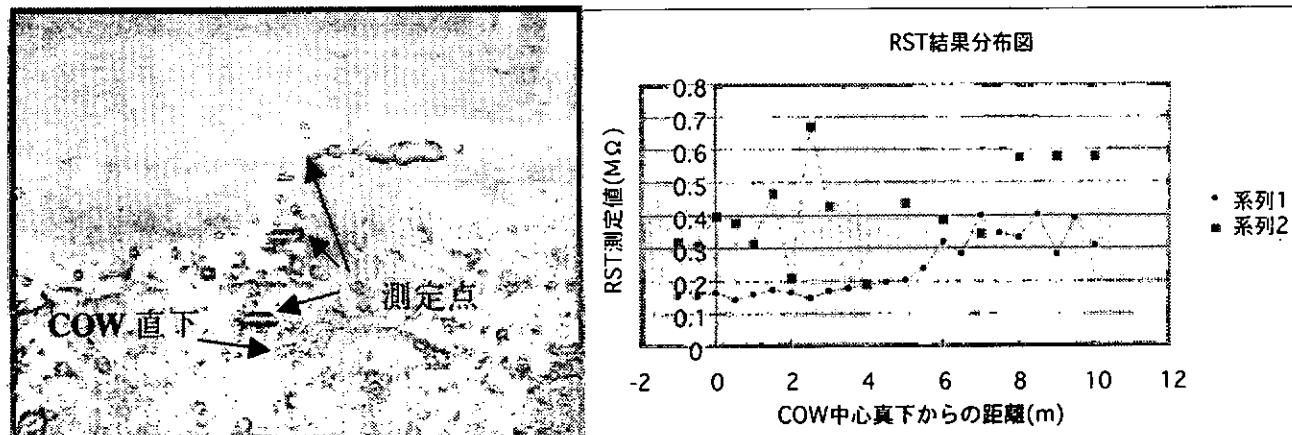


図 17 タンク底板の RST によるオイルコートの健全性評価

### 3.3.5 タンク底板の温度

船型の違いによるタンク底板温度に及ぼす影響の有無を明らかにするために、実船での温度計測とシミュレーション解析を実施した。シミュレーション解析結果を図 18 に示すが、原油満載時には D/H は S/H に比べて約 5~10°C 高温側に保持され、バラスト航海時には両者に温度差は殆ど存在しないことが明らかになった。また、上甲板では S/H と D/H の間で温度差は生じないことが判明した。

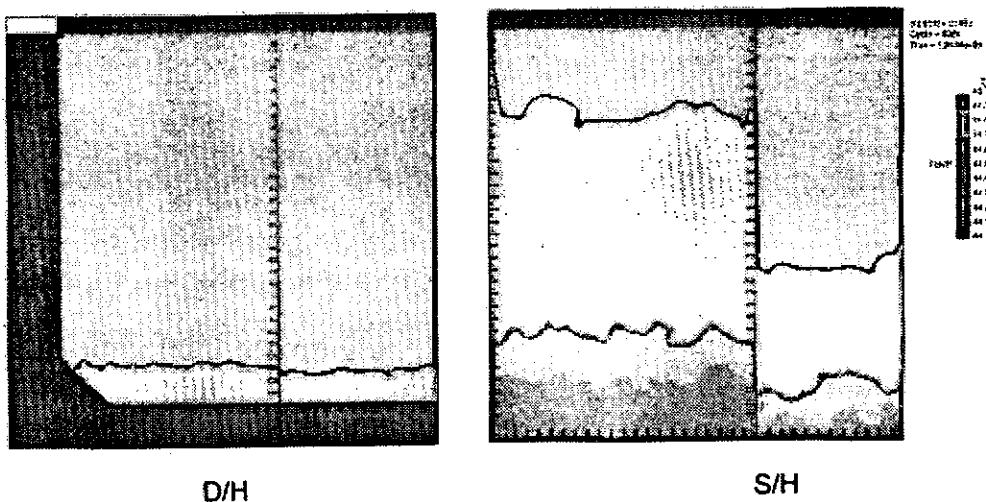


図 18 COT 内の温度分布シミュレーション結果(原油満載時 : D/H&S/H)

### 3.3.6 実船暴露試験

運行中の D/H の船底近傍のホリゾンタルガーダー上に暴露試験片を設置し、約 2 カ年の暴露試験を実施した。試験片は、MS と TMCP 鋼の 2 種類で、表面処理をミルスケール付き、表面研削、ショットブラスト、ショッププライマー塗装の 4 種類を用意した。また、滞留水の影響が明確に現れるよう、各試験片の 4 周縁を高くする形状にした。各試験片の表面錆除去後の状況を図 19 に示すが、表

面に明瞭に孔食が発生していることが分かる。

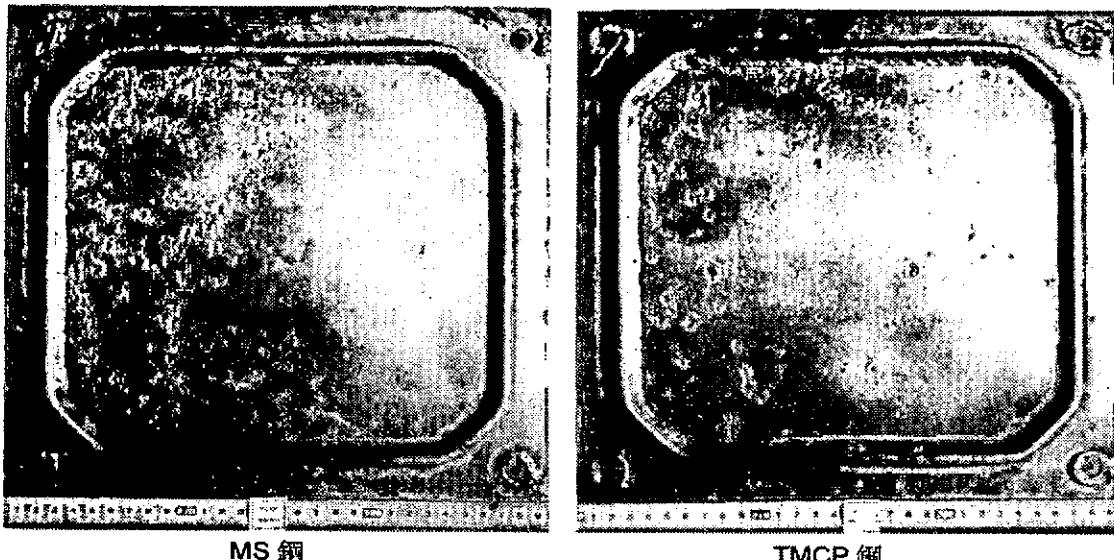


図 19 暴露試験結果（試験片外観：表面錆層除去後の状況）

鋼種および表面処理が孔食発生に及ぼす影響を評価したが、TMCP 鋼と MS の間で差はなく、表面にミルスケールがあるものは孔食が生じやすいことが判明した。また、ショッププライマーも孔食に對しては殆ど耐食性の効果がないことが分かった。

### 3.3.7 実験室実験

実船調査で得られた知見より、孔食発生には、不完全な表面皮膜の存在、腐食環境、マクロセル形 成物質等が重要な要因であると考え、これらの因子の影響を確認するために、実験室での孔食の再現 試験を試みた。

#### ① 腐食環境

COT 内は  $H_2S$  と  $O_2$  の共存する強腐食性気相環境であり、かつ底板部に濃海水が滞留することが明らかになった。そこでタンク底板を模擬した人工海水もしくは食塩水中における炭素鋼 (MS と TMCP 鋼) の腐食速度に与える  $H_2S$  濃度の影響を調べるために試験を実施した。孔食発生した条件を図 20 に示す。10%  $H_2S$  条件で、孔食が再現されることが複数の試験で確認され、また、非常に高濃度  $H_2S$  条件では孔食の発生が確認された。しかし実際の COT 中の  $H_2S$  濃度数は 100ppm～3000ppm と低いので、高濃度  $H_2S$  が孔食誘起の直接の主要因であるとは考えにくい。

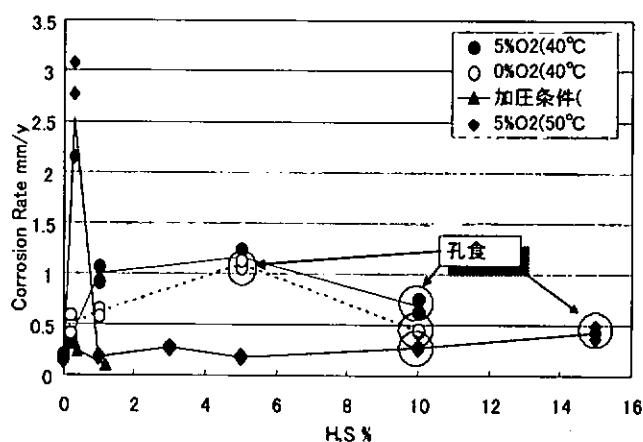


図 20 人工海水や塩水中における炭素鋼の腐食に与える  $H_2S$  の影響と孔食の発生

## ② FeS や単体 S の存在

孔食発生（アノードサイド）部に対し、その周辺がカソードとして作用することで、マクロセル電池を形成して孔食の進展速度を著しく加速させることは良く知られている。そこで各種のアノードとカソードの組み合わせにより腐食電位の評価を行った結果、スラッジ堆積部が非堆積部に対してカソードとして機能することが明らかになった。更に、スラッジに含まれる単体 S と FeS に注目し、MS および TMCP 鋼と S と FeS のピレットを含む各種表面電位を計測したところ、S の鋼材表面での存在がカソードとして作用し、局部腐食を促進することが明らかになった。その結果を図 21 に示す。この実験では粉末 S 塗布部の境界に微少孔食の発生が認められ、これは、S 塗布面と非塗布面で局部マクロセルが形成されたものと考えられる

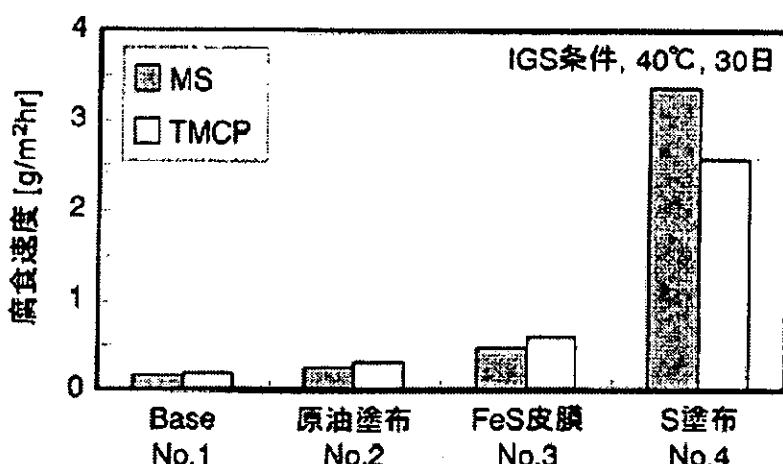
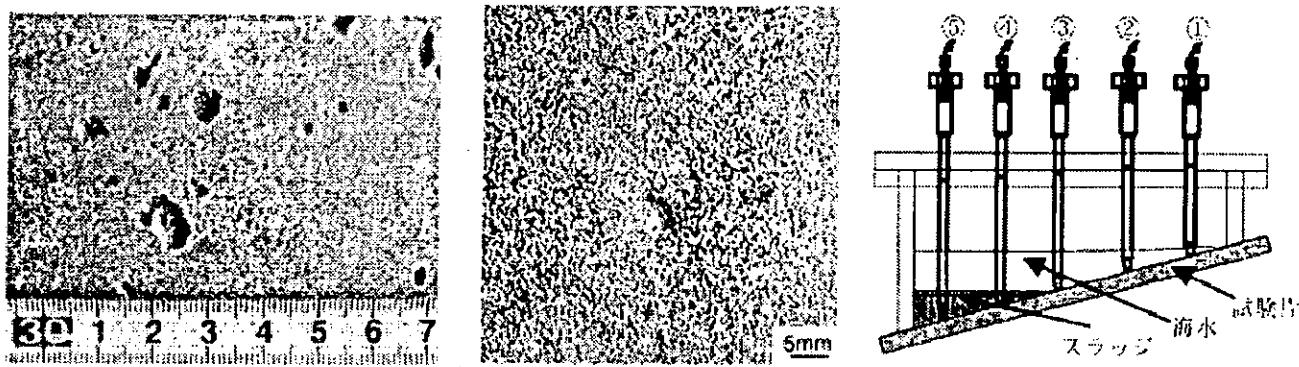


図 21 各種塗布材の電位および分極測定に基づく腐食速度の比較

## ③ 大型タンク模擬試験

タンカーの COT の底板を模擬した大型タンク試験装置を製作し、孔食再現試験を実施した。装置には気相と液相があり、気相には IGS に 3000~5000 ppm H<sub>2</sub>S を添加したガスを使用し、液相部には海水を張った。試験片はミルシートのまま、スラッジとパラフィン混ぜて塗布した模擬オイルコート塗布試験片等で行った。試験片は傾斜させ、実船より採取したスラッジを試験片上に置いたが、非堆積部も作り出した。図 22 に試験装置と試験結果の一例を示す。ミルスケールままおよび模擬オイルコート塗布試験片で、進行速度の速い孔食を実験室的に再現することができた。特に、ミルスケール付きの試験片では、実船で見られたのと酷似したシャープな孔食が再現された。



鋼材表面：ミルスケールの場合 鋼材表面：模擬オイルコートの場合 大型孔食再現試験装置

図 22 実船 COT 底板模擬試験（ミルスケール、人工オイルコート評価）

### 3.3.8 タンク底板の孔食発生メカニズム

鋼材鋼材の孔食発生にはいくつかの条件を満たす必要がある。1つは腐食を局在化させるための腐食環境の不均一化であり、もう1つは孔食の成長を維持するための酸化剤の存在である。不均一は、水の局在化、局所的なpHの低下、不完全皮膜の存在等であり、実船調査でも確認されている。不完全皮膜としては、ミルスケール、オイルコートの不均一性や欠陥などが挙げられる。また、孔食成長の駆動力は、イナートガス中のO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>の存在、錆の酸化力、固体S、FeSの偏在、pHの低下が考えられる。これらの孔食発生および成長について推定される因子を図23に示す。

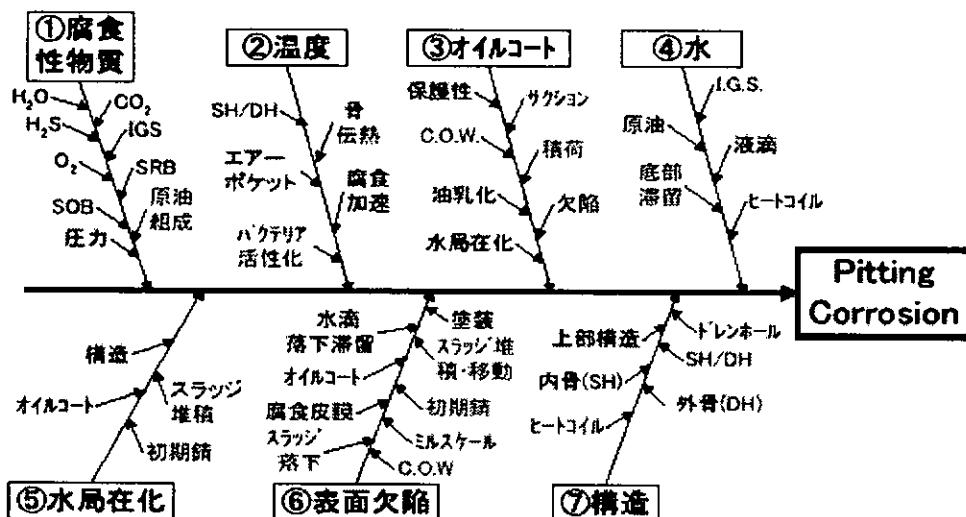


図23 タンク底板の孔食発生の要因図

また、想定されるCOT底板の孔食発生、成長のメカニズムを図24に模式的に表わした。

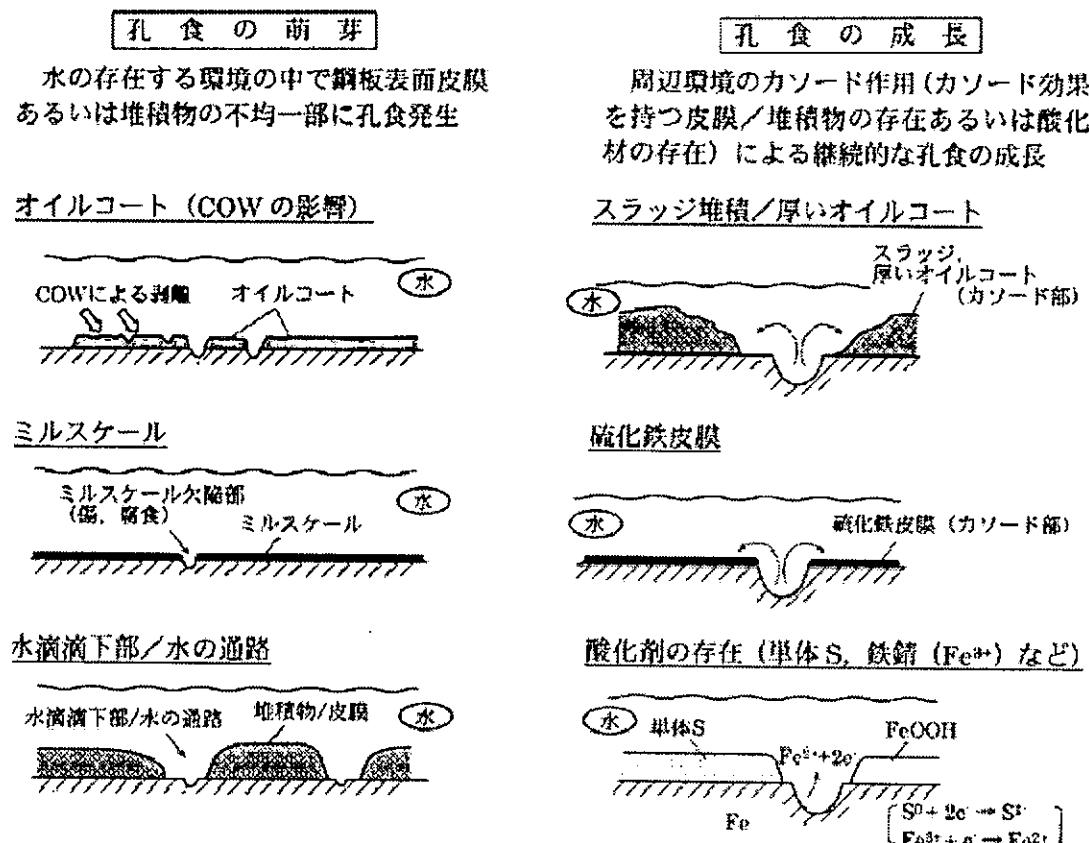


図24 タンク底板の孔食発生の模式図

## ①S/H と D/H タンカーの船型の差

S/H ではタンク底板上面に骨材が存在し、これが底板部オイルコートの保護性確保に有利となる。一方、D/H タンカーでは骨材が存在しないため、COW によってタンク底板部が直接洗浄され、オイルコートが薄膜化する。その結果、D/H では S/H タンカーに比較して、就航直後から孔食発生頻度が高くなるものと結論づけられる。

また、S/H と D/H タンカーの COT 内部の温度計測結果および数値解析により、原油満載時には、D/H 底板は約 5~10°C 程度 S/H よりも高温に保持されることが分かった、しかし、その温度差が腐食速度に与える定量的な差異についての結論には至っていない。

## ②鋼材種類 (TMCP 鋼と MS) の差

D/H タンカーでの 2 カ年にわたる暴露試験評価では、MS と TMCP 鋼の間で大きな差異は認められなかった。また、カソード反応を増大させる固体 S の影響確認の実験室試験、あるいは局部腐食を生起しうる原油上の水の局在化試験においても、MS と TMCP 鋼に差異は見られなかった。これらの結果から、タンク底板の孔食に対して、MS と TMCP 鋼の耐食性に差がないと結論づけた。

## 3.4 腐食発生防止対策

一般的な防食方法に対し、前項のタンカーの腐食発生要因、メカニズムに関する研究成果とを付き合わせて有効な防食対策を考えた。その結果の概要を表 4-1 と 4-2 に示す。これをベースに原油タンカーの新形コロージョン対策として、具体的な手法に展開・適用される。

表 4-1 上甲板裏面の防食方法

項目	タンカー-COT 内防食への具体的検討項目
設計の改善	原油から排出される腐食性ガスとの接触、結露を防ぐ構造。 ・満載時の原油と上甲板間の空隙を削減。 適正な板厚増加 (腐食代)
被覆・塗装	有効な被覆・塗装
環境処理	腐食環境の改善 ・腐食発生要因となるガス成分の排除/削減/低減。 ・腐食進行速度を低下させるために、上甲板温度の低下。 →上甲板の水冷／フィン構造物の付加／日除け設置等。
防食管理	腐食モニタリング装置の活用 ・腐食速度の算出。防食方法の有効性の確認。 ・定期点検による板厚計測データの評価・活用。

表 4-2 タンク底板の防食方法

項目	タンカーCOT 内防食への具体的検討項目
設計の改善	<p>鋼材表面への滞留・堆積物を生じない構造を考案。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>タンク底板に若干の傾斜を付けて滞留水の円滑な排除。</li> <li>タンク内の液体（原油、COW等）の流れの構造改善。</li> <li>均一な鋼材表面のオイルコーティング層の形成を助成。</li> <li>底板への COW シャドー形成領域の拡大。</li> </ul> <p>適正な板厚増加</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>腐食代の適正化（特定箇所：上部構造よりの液滴滴下増厚）。</li> </ul>
被覆・塗装	<p>有効な被覆・塗装</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>孔食防止対策として、塗装は有効な一手法。</li> <li>ただし、塗膜品質を誤ると被害を増大させる危険性あり。</li> </ul>
環境処理	<p>腐食環境の改善（孔食発生/成長）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>腐食発生要因となるガス成分の排除/削減/低減 →孔食発生腐食性物質（単体 S 等）の生成量の削減。</li> <li>発生要因となる鋼板表面の不均一皮膜の生成削減/排除 →健全オイルコート膜（適正・均一厚さ）形成に向け、COW 照射条件の最適化検討。</li> <li>孔食成長はマクロセル形成に起因し、この形成を阻止/排除。 →水分の排除（加熱/物理的） →スラッジ等のカソード物質の排除（物理的/電気的）</li> </ul>
電気防食	<p>犠牲陽極の設置</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>タンク底板に滞留水量が少ない場合、作動効果に配慮必要。</li> </ul>
防食管理	<p>極値統計法を活用した孔食進行速度の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>進行速度の評価はある程度類推可能なレベルまで達す。</li> </ul>

#### 4. 得られた成果

本研究は、原油タンカーで発生している腐食の原因とメカニズムを明らかにすることが目的である。研究に際しては、不必要的誤解や不安を招かないようにするために、出来るだけ客観的なデータ収集を行い、また実船調査に基づいた腐食の実態を解明に努めた。計測および観察結果を的確に解析すると共に、室内実験を通して事実をより深く理解し、確実なメカニズム解明となるよう努力を払った。以下に得られた成果を示す。

##### 1) 腐食発生メカニズム

###### ① 上甲板裏面の腐食（全面腐食）

COT 内の主要ガス成分として  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_x$  が存在する。 $H_2S$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  が共存するという自然界では存在し難い非常に厳しい環境下にある。昼夜の温度差によって、COT 内の上部に滞留するガス成分が上甲板裏面で結露現象を引き起こし、常にウェットな状態となっている。

$H_2S$  と  $O_2$  が共存するガス環境条件下では、酸化鉄表面の触媒作用で鉄表面上に固体 S が析出するため、単体 S と鉄錆が層状に配列する腐食生成物を形成する。この固体 S の析出反応は鉄の腐食とは無関係であり、腐食生成物の量は腐食速度と関係しない。また、単体 S の層でこの腐食生成物は剥離、離脱を繰り返すが、この剥離現象が腐食速度の加速要因とはならない。また剥離錆はその 60% が S 成分である。

## ② タンク底板の腐食（孔食）

孔食鋼板表面に形成された皮膜（オイルコート、FeS等）の不均一性、腐食性物質、水分、カソード物質等の存在によるマクロセルの形成で生じる。今回の腐食問題では鋼板表面に形成されるオイルコートの生成とその健全性が非常に重要で、D/Hではその膜厚がS/Hに比較して薄く、残存領域が少ないようと思われた。膜の不均一性にはオイルコート、孔食の発芽には単体S、水は原油中に含まれている濃海水が、さらに、スラッジがカソード物質として重要な役割を果している。

## 2) 腐食に及ぼす船型の影響評価

### ① 上甲板裏面の腐食（全面腐食）

上甲板の鋼材表面の温度計測をS/HおよびD/Hで実施した。両者での計測値は大差なく、日中には最高60°C、夜間に程度に低下し、COT内の上部ではガス成分の結露が起こっている可能性が高い。S/Hタンカーが中心のNK殿の板厚計測データとS/HおよびD/Hの実船計測データを照合したが、上甲板の減肉量（全面腐食）について船型の影響は見られなかった。

### ② タンク底板の腐食（孔食）

COT内の温度シミュレーション結果によると、D/Hタンク底板の温度は、S/Hの場合よりも、原油満載航行時に5~10°C程高温側で推移する。しかし、バラスト航海時にはS/HおよびD/H間で差異は無かった。この温度差が孔食発生と成長に及ぼす定量的な影響は未評価である。

タンク底板の孔食に関しては、内骨の有無による船型の影響があり、D/Hの孔食発生頻度はS/Hよりも多い。しかし、入渠から入渠までの期間（2.5カ年）の孔食速度を極値統計で整理した結果、S/HとD/Hでの孔食進展速度に大きな差異は無かった。（NK殿所有および実船計測データ）

## 3) 腐食に及ぼす使用鋼材の影響評価

上甲板およびタンク底板の腐食現象とともに、COT内での暴露試験結果ならびに実験室内比較評価試験の何れにおいても、TMCP鋼およびMSの間で腐食発生形態、進行速度に何ら異なる点は認められなかった。また、NK船籍の最近建造された船舶から建造後20数年を経た種々のタンカーの板厚計測データをベースにTMCPとMSの上甲板の腐食減肉量を比較したが、大きな差異は認められなかった。

## 4) 防食方法

### ① 上甲板裏面の腐食

上甲板の全面腐食はCOTタンク内の腐食性ガス（H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>）が上甲板の昼夜の温度変化に伴う結露現象に伴う腐食が主原因となる。これをベースに防食方法の在り方を考える。

- ・ H<sub>2</sub>Sが非常に腐食環境を大きく支配するガスであり、その除去。（脱硫技術は大気汚染防止などで培ったノウハウが生かせる、他のガスは除去が困難）
- ・ 地上タンク等では空隙の無い方式（稼動ルーフ）が採用され、原油と上甲板の間にガス層が生じない方策考案。
- ・ 温度上昇時に腐食速度が加速されることが、腐食モニタリングによって確認されており、上甲板の冷却。

- ・腐食予備厚の適正化。従来船と基本的に腐食進行速度には大きな差異が無いと思われるが、船主、造船所が経験則を生かして適正值の選定。

## ② タンク底板の腐食

タンク底板の腐食は孔食であり、その生成機構は、鋼材表面の不均一（オイルコート、FeS、塗膜）、滞留水、腐食性物質（活性剤）、カソード（スラッジ）等が複雑に絡み合っているが、底板のオイルコートの保護性がその発生頻度に関ると推定される。

- ・底板表面上のオイルコートの健全性確保（膜厚、低含水量等）が重要で、COW の運用（含む条件の再考）方法の検討。
- ・腐食環境の改善（例：H<sub>2</sub>S の低減）と共に、底板での滞留水、スラッジ堆積、上甲板からの落下錆（高硫黄含有物）等の速やかな排除が可能な構造等の検討。
- ・従来の防食法（塗装/電気防食）の検討（塗装に関しては品質管理を十分に行わないと孔食の被害を増加させる危険性在り）。

本研究は、国内外で問題化している石油タンカーの腐食を正面から受け止め、実船調査と室内実験等を通して、発生状況、データの収集整理および発生メカニズムを解明した。今回の研究を基に更なる有効なデータの蓄積に心掛け、国際競争力を失わない有効な腐食問題解決に取り組み、より一層安全なタンカー運航が達成されるように努めたい。

## 5. 最後に

本研究は、大学、海上技術安全研究所、船級協会等の協力の下、造船会社、海運会社、鉄鋼会社より選出頂いた委員の参画等、幅広い技術力を結集して実施した。実船調査、暴露試験体や腐食モニタリング装置の取り付け等には、海運会社の関係者に多大なるご尽力を頂きました。また、室内実験および試験体の分析/計測等では、海上技術安全研究所・鉄鋼各社・造船会社に各段のご協力を賜り、ここに関係者一同に心よりお礼申し上げます。

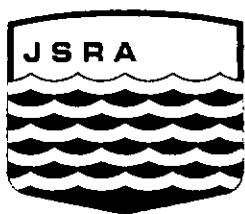
また、本研究の成果は国内外で非常に注目を集めている。本委員会でも、シドニーで開催されたINTERTANKO や、東京とパリで開かれた TSCF (Tanker Structure Cooperative Forum) において研究成果を講演し、誤った情報の払拭に非常に有効であった。

---

発 行 平成 14 年 3 月  
発行所 社団法人 日本造船研究協会  
〒105-0001 東京都港区虎ノ門一丁目 15 番 16 号  
　　　　　　海洋船舶ビル 6 階  
電 話 総務部 03-3502-2132  
　　　　　　研究部 03-3502-2133  
F A X 03-3504-2350

---

「本書は、競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて  
作成したものを増刷し頒布するものです。」



The Shipbuilding Research Association of Japan