

造船用高機能鋼 JFE スチールのライフサイクルコスト低減技術

High Performance Steel Plates for Shipbuilding —Life Cycle Cost Saving Technology of JFE Steel—

伊木 聡 IGI Satoshi JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員(副課長)・工博
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(副課長)
平井 龍至 HIRAI Tatsushi 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(課長)

要旨

船舶のライフサイクルコスト低減に関する造船用鋼材の商品設計の考え方ならびに開発商品の性能について紹介する。原油タンカー上甲板用耐食鋼 NAC5 は現用鋼と比較して耐食性が約 10% 向上し、プライマー寿命を約 2 倍にする。両方の効果を合わせて、上甲板の減耗による切替が必要となる船齢を 5 年延長すると予測される。高疲労特性鋼板 AFD は疲労き裂の伝播寿命を 2 倍以上にすることができる。

Abstract:

The product designs and properties of newly developed anti-corrosion steel plates and high fatigue property steel plates that are expected to reduce the life cycle cost of ships are described. The anti-corrosion steel plates for crude oil tankers, "NAC5," enhance the life duration of upper deck plates 5 years longer than conventional steel plates due to the improvement of corrosion resistance and the extension of primer lifetime. The anti-fatigue damage steel plates, "AFD," show more than twice longer fatigue propagation life compared with conventional steel plates, as well as improved fatigue strength.

1. はじめに

近年、経年船の増加にともない、腐食や疲労に起因する船体損傷が問題となっている。船体寿命は主に腐食と疲労の進行によって決定され、既存船の LCC (ライフサイクルコスト) 低減のためには正確な余寿命評価による合理的な補修の実施とともに、腐食や疲労に耐性を持った材料の開発が切望されている。

タンカーの原油タンク空隙部は、防爆のために充填された燃焼排ガスと原油から揮発する H₂S の混合雰囲気曝露に曝され、特に上甲板裏面は昼夜の温湿度変化による乾湿繰り返しという過酷な腐食環境におかれる¹⁾。しかし、腐食に関する定量的知見が不十分なため、確立された防食策がないのが実状である。急がれる防食策の確立に向けた取り組みとしては、1999 年以来、鉄鋼・造船・船主各社共同により組織的に進められた(社)日本造船研究協会第 242 研究部会 (SR242²⁾ があるが、当社ではこれまで「NAC (new anti-corrosion)」シリーズとして各種の低合金耐食鋼を商品化してきた知見を活かし、ショッププライマーとの組み合わせにより十分な耐食性を実現する原油タンカー上甲

板向けの耐食鋼「NAC5」を開発・商品化した。

一方、船体構造部材は波浪により繰返し応力を受けるため、応力集中の大きな形状不連続部や溶接止端部などから疲労き裂の発生・進展を生じ、最終的に貫通・破断にいたり大事故を引き起こす場合がある。このような疲労による損傷に対しては、LCC の増加を防ぐ観点からも、適切な設計寿命・安全率を設定し、どのように保証していくかが大きな課題となっている。2001 年度に開始した第 245 研究部会 (SR245³⁾ を契機に、溶接部に想定された初期欠陥からの余寿命を鋼材のき裂伝播性能に基づいて適正に評価し、ライフサイクルにわたる船体構造安全性の合理的な向上を図ろうとする動きが始まっている。最近、(財)日本海事協会 (NK) やノルウェー船級協会 (DNV)、ロイド船級協会 (LR) の各船級では疲労き裂伝播特性に優れた鋼材を対象とした新たな付記符号を設定している。このような造船業界での動きに対応して当社では優れた疲労き裂伝播性能を有する鋼板「AFD (anti-fatigue damage)」を開発・商品化した。

本報告では、上記のような造船業界での LCC 低減のニーズに対応すべく開発した、原油タンカー上甲板向けの耐食鋼と船体構造用高疲労特性鋼板について、商品設計の考え

方ならびに性能について紹介するとともに、LCC 低減に関する評価技術についても紹介する。

2. 原油タンカー上甲板用耐食鋼「NAC5」

2.1 原油タンカー上甲板裏面の腐食

2.1.1 実船における腐食の状況

燃焼排ガスの代表的な化学組成は Fig. 1 に示すように約 14% CO₂-8% O₂-0.03% SO_x-bal.N₂ である。また、上甲板の温度は、一年を通して昼夜で最低温度 5-25℃、最高温度 35-60℃ の間の繰返しとなる。上甲板裏面で生じる腐食反応そのものは、通常の大気腐食反応と同様であり、これが SO₂ および原油から揮発する H₂S により加速されると考えられる。さらに、H₂S と H₂O を含むガス雰囲気において 酸化鉄(FeOOH)が存在すると固体 S が析出する。この析出した固体 S が層状に分布するために腐食生成物は容易に剥離する。さび層は保護性を持つことがないため、腐食は連続して進行し、腐食速度は減少しないと考えられる。

2.1.2 実験室における腐食環境の再現

上甲板裏面の腐食環境における耐食性を評価するため腐食試験装置を製作した。この装置による再現環境は SR242 における検討結果に準じており、腐食形態や腐食生成物が実環境とよく一致する条件である。実験装置の概要を Fig. 2 に示す。試験槽内の温度および露点を一定とし水冷パネルを用いて試験片温度を変化させることにより乾湿繰返し環境を再現した。また、試験雰囲気は、燃焼排ガスと H₂S の混合雰囲気を模擬した CO₂-O₂-SO₂-H₂S-N₂ 混

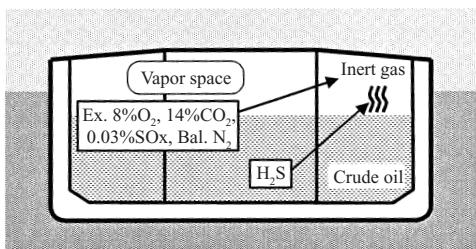


Fig. 1 Cross section of oil tanker and corrosive environment in crude oil tank

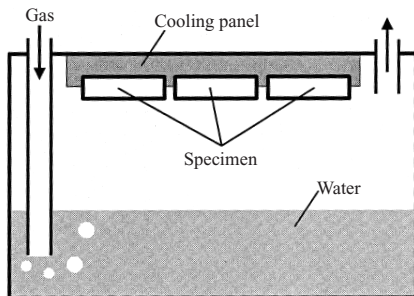


Fig. 2 Corrosion simulation system

合ガスを用いた。

2.2 上甲板用耐食鋼「NAC5」の開発

2.2.1 NAC5 の耐食合金設計

NAC5 は上述した上甲板裏面が曝される環境において有効な耐食性を発揮し、さらに機械的性質、溶接施工性についても造船用鋼材として十分な性能を有する耐食鋼である。成分設計では、固体 S 析出環境において耐食性を発揮する合金元素に着目するとともに、一次防錆として塗布されたショッププライマーの寿命延長による腐食抑制効果も考慮した。耐食性評価は無塗装材に加えて、ショッププライマー塗布材についても実施した。試験条件は次のとおりである。

雰囲気 : 12%CO₂-5%O₂-0.01%SO₂-0.1%H₂S-bal.N₂
 温度 : 30 -50 (露点 40)
 乾湿サイクル : 乾燥 1 h-移行 3 h-結露 1 h-移行 3 h
 試験時間 : 720 h (30 日)

腐食試験後、無塗装材についてはさびを除去して重量減少量を求め、プライマー塗布材についてはプライマーを除去してクロスカット部からの腐食進行幅を測定した。腐食量および腐食進行幅は現用鋼に対する比率で表した。

合金元素が耐食性に与える効果は、Cu、Ni、Cr などの合金元素について、それぞれの有効添加量を求め、最終的には耐食性だけでなく、機械的性質、溶接施工性の維持コスト増加抑制にも留意して成分の最適化を図った。

Table 1 に NAC5 の化学組成例を Fig. 3 に NAC5 の腐食試験結果を示す。無塗装材については、現用鋼と比較して母材で約 10%の腐食量減少、溶接継手についても母材に近い耐食性が認められた。溶接材料には現用材を用い

Table 1 Chemical composition of NAC5 (mass%)

Grade	C	Si	Mn	P	S	Others	sol.Al	C _{eq} *
D32 (IACS)	0.14	0.24	1.02	0.018	0.005	**	0.022	0.33
	≦	≦	0.90	≦	≦		≧	≦
	0.18	0.50	/1.60	0.035	0.035	***	0.015	0.35

* C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15

** Alloy elements added.

*** Nb + V ≦ 0.12, Ti ≦ 0.02, Cu ≦ 0.35, Cr ≦ 0.20, Ni ≦ 0.40, Mo ≦ 0.08
 IACS: International Association of Classification Societies

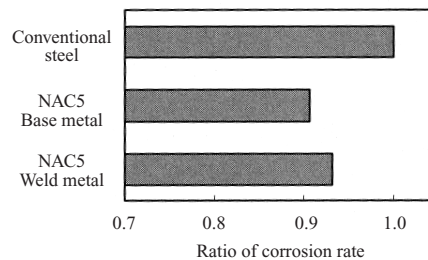


Fig. 3 Corrosion test results of NAC5 and conventional steel (Gas : CO₂-SO₂-H₂S-O₂-N₂, 720 h)

Table 2 Mechanical properties of NAC5

Grade	Thickness (mm)	Tensile test			Charpy impact test
		YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)	\sqrt{E}_{-20} (J)
D32	25	375	502	28	202
(IACS)		≥ 315	440/570	≥ 18	≥ 31

\sqrt{E}_{-20} : Absorbed energy at -20°C

Grade	Thickness (mm)	Welding method	Heat input (kJ/cm)	Tensile test		Charpy impact test				
				TS (MPa)	Fractured location	\sqrt{E}_0 (J)				
						Weld metal	FL	HAZ1	HAZ3	HAZ5
D32	25	FCB	137	492	Base metal	163	126	110	102	89
(IACS)		-	-	≥ 440	-	≥ 34				

FL : Fusion line, HAZ1, 3, 5 : Heat affected zone of 1, 3, and 5 mm from fusion line

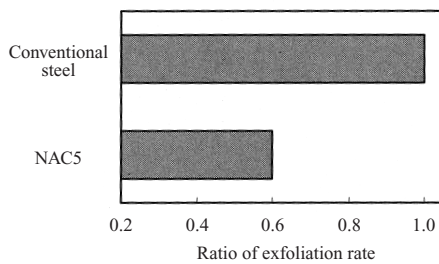


Fig. 4 Corrosion test results of cross cut specimens coated with shop primer

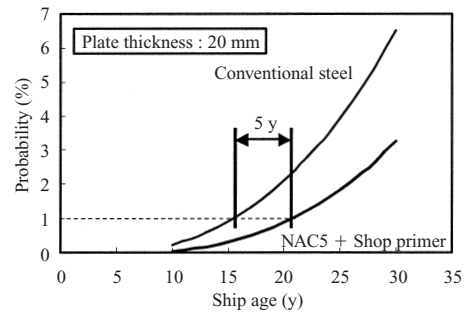


Fig. 5 Estimated life of deck plate

たが、母材中の耐食性向上に有効な成分の希釈により、溶接部の耐食性も向上するよう配慮している。

また、プライマー塗布材では Fig. 4 に示すように、約 40% の腐食進行幅減少が認められた。これはプライマーの剥離寿命を約 2 倍延長できることを示している。クロスカット以外の部分についても NAC5 のプライマー残存率がより高かった。プライマー塗布材の溶接継手についても腐食試験を実施したが、局部腐食およびプライマーの剥離は認められなかった。

以上のとおり、NAC5 は、プライマー寿命延長効果を有する上甲板用耐食鋼である。NAC5 が実船に適用された場合の上甲板の寿命延長効果については 2.2.3 項に記述する。

2.2.2 NAC5 の機械的性質および溶接継手特性

NAC5 母材および溶接継手の機械的性質を Table 2 に示す。溶接継手については、ショットブラスト後、Zn プライマーを塗布し、上甲板鋼板の溶接として通常用いられている片面サブマージアーク溶接 (FCB 溶接) を行い、その機械的性質を評価した。いずれの項目についても規格を満たしており、NAC5 は現用鋼と同等の溶接施工性を有していることが分かる。

2.2.3 NAC5 の適用による上甲板寿命延長の予測

上甲板裏面の腐食の時間変化について、(財)日本海事協会在が所有するデータベースおよび山本の腐食の確率モデルによる評価結果⁴⁾を用いて、上甲板の切替確率、すなわち上甲板の腐食衰耗量が許容値を超えたために切替が

必要となる確率を計算した。NAC5 を適用した場合の寿命延長の予測結果を、設計板厚 20 mm の場合について、現用鋼と比較して Fig. 5 に示す。鋼材の許容衰耗量を板厚の 20%、すなわち設計板厚 20 mm の場合は 4 mm と仮定し、腐食衰耗量がその 4 mm に達した時に部材切替が発生するものとして、材料ごとに使用期間と切替確率を求める。NAC5 のプライマー寿命延長効果によるプライマー寿命を 2 年とし、鋼材単体の約 10% の耐食性向上による腐食速度の減少効果を合わせた結果、切替確率 1% に達するまでの時間は約 5 年延長すると推定される。すなわち NAC5 の適用により、上甲板寿命は 5 年延長できる。

2.3 NAC5 のタンカー底板への適用時の特性評価

2.3.1 底板環境および模擬試験

タンカー底板における腐食形態はお椀状の孔食であり全面腐食となる上甲板裏面とは異なる腐食環境であると考えられる。底板表面には原油成分であるオイルコート約 8% NaCl を含む滞留水の存在、さらに上甲板裏面から落下したさびを主体とするスラッジの堆積が確認されている。何らかの原因でオイルコートの保護性が失われた部分に滞留水および落下さび中の単体 S や FeS が作用することによりマクロセルが形成され、孔食が発生、進展するものと考えられる。SR242 が行った国内船主主体のアンケート調査によれば、原油タンク底板表面は 57% が無塗装 (黒皮およびショットブラスト)、25% がターレエボキ

シ塗装, 18%が一部または全面ショッププライマー塗布である。タールエポキシ塗装は塗装欠陥を起点に激しい孔食が生じる危険性があるため, オイルコート of 保護性を期待した無塗装仕様が多くの現状である²⁾。

NAC5 の優れた耐食性は, H_2S や単体 S が存在する底板環境でも期待できる。タンカー底板の腐食環境における耐食性を評価するため, 模擬腐食試験を試みた。ショットプラスト後の表面にオイルコート塗布した試験片を 50 に保持した人工海水中に浸漬した。溶液には 5% O_2 -10% H_2S -bal. N_2 混合ガスを飽和させ, 60 日および 120 日後の孔食発生状況を観察するとともに重量減少を求めて比較した。

2.3.2 底板適用の効果

模擬腐食試験の結果, NAC5 無塗装材では, 現用鋼と比較して約 15% の腐食量減少が認められた。孔食発生については, ラボにおける短期間の調査では有意な差は認められなかった。一方, (株)商船三井において実施された実船調査では, 無塗装の現用鋼に対し, ショッププライマーを塗布した現用鋼の孔食発生数が 1/20 以下と非常に少ないことが確認されている。プライマー寿命の延長効果を有する NAC5 にショッププライマー塗布して原油タンク底板に適用することにより, 耐食性の向上および孔食発生の抑制が期待できる。

3. 高疲労特性鋼板「JFE-AFD」

3.1 船体における疲労損傷

船舶では, 波浪, プロペラやエンジンによる振動, 積荷・バラストによる内圧変動など各種の繰返し荷重が疲労損傷の原因になる。特に波浪による繰返し荷重は就航 20 年でおよそ 10^8 回の平均繰返し回数に達するとされており船体構造部材に大きなき裂を生じる可能性を有す主要因と位置付けられている。(財)日本海事協会より出版されている「タンカーの構造強度に関するガイドライン」⁵⁾にも Fig. 6 に示すシングルハル船体構造を例にすると, 縦横部材(サイドロンジ, トランスリング)交差部やサイドストラット端部が疲労強度検討部位に挙げられている。これらの部位での損傷は, シングルハル VLCC (大型タンカー)において過去に多数発生したものであるが⁶⁾, ディテール

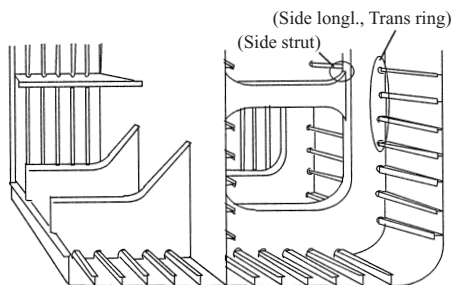


Fig. 6 Typical ship structure of single-hull tanker

的にはダブルハル VLCC でも発生しうると考えられている。また, 二重底フロア材のスロット開口部周りは母材からのき裂発生に注意が払われている部位である。これらの構造部材には板厚 15 mm-25 mm 程度の鋼板が主に用いられている。

3.2 高疲労特性鋼板の製造指針の検討

3.2.1 造船用従来鋼の疲労き裂伝播性能

疲労損傷に対する安全裕度の向上に寄与する高疲労特性鋼板の開発にあたり, 定常的に製造されている造船用 YP32, 36 kgf/mm² 級鋼板の疲労き裂伝播性能の調査を行った。その結果 Fig. 7 に示すように疲労き裂伝播速度は広い範囲に広がっており, その上限のき裂伝播速度は下限の 2 倍程度であることが確認された。また, 疲労き裂伝播速度の遅いものは最近船級にて疲労き裂伝播特性に関する付与記号が認められている鋼材と同レベルの性能を示していることも確認された。そこで, 以下のような開発方針を定め, 高疲労特性鋼板の開発を行った。

3.2.2 高疲労き裂伝播性能向上の開発コンセプト

まず, 成分系については, 従来材においても良好な疲労き裂伝播性能を示しているものがあること, 成分系の大幅な変更は強度・靱性などの母材性能はもとより, 溶接部性能, ひいては溶接施工性にいたるまで大きく変化させる可能性があることから, 成分変更は行わないこととした。高疲労き裂伝播性能の確保は主としてマイクロ組織制御に行い, 広範囲に広がっていた疲労き裂伝播速度を低速度側へと制御するために, 当社独自技術 Super-OLAC (on-line accelerated cooling) をはじめとする TMCP (thermo-mechanical control process) 技術を高精度に駆使した。疲労き裂伝播速度に関する開発目標値は $\Delta K = 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ で $1.5 \times 10^{-8} \text{ m/cycle}$ 以下 $\Delta K = 25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ で $7.8 \times 10^{-8} \text{ m/cycle}$ 以下とした。これは, Fig. 7 の従来材のデータ範囲のほぼ中央値以下に対応する。

Fig. 8 に疲労特性を向上させるためのマイクロ組織の制御

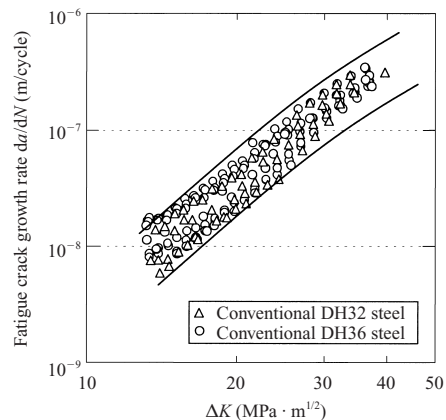


Fig. 7 Fatigue crack growth property of conventional YP32, 36 class steels

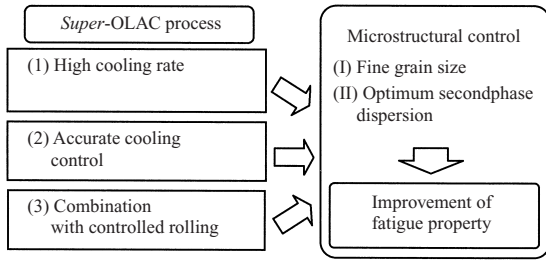


Fig. 8 Improvement of fatigue property by Super-OLAC

指針を示す。一つめは結晶粒の微細化であり、高冷却速度を有する Super-OLAC を活用して、結晶粒の微細化によりき裂伝播抵抗となる粒界数を増加させる。二つめは高精度組織制御であり、ミクロ組織の配向（偏りと方向性）をなくし、できるだけ多くの硬質第 2 相（たとえばパーライト）を分散させることにより、疲労き裂の硬い第 2 相への衝突と迂回の確率を最大化し、疲労き裂伝播特性を向上させる。

3.3 高疲労特性鋼板の性能

上述のような開発コンセプトに基づき選定・制御した製造条件により高疲労き裂伝播性能鋼板の実機製造を行い鋼板と溶接継手の各種基本的性能と疲労特性（疲労き裂伝播特性、疲労強度）を調査した。以下に代表的な試験結果を示す。

3.3.1 基本性能

Table 3 に YP36 kgf/mm² 級の E 級鋼の化学組成を示す。従来材の化学組成と同等である。Table 4 に引張試験結果曲げ試験結果、シャルピー衝撃試験結果の例を合わせて示す。いずれも規格値を満足する良好な性能を示している。溶接部の性能は溶接入熱 14.5 kJ/mm の FCB 溶接継手における溶接金属および HAZ でのシャルピー特性で評価したが、いずれの部位においても継手部として十分な靱性を

Table 3 Typical chemical composition (mass%)

Grade	C	Si	Mn	P	S	C _{eq} *	P _{CM} **
EH36	0.12	0.35	1.32	0.015	0.004	0.35	0.20

* C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15

** P_{CM} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Mo/15 + V/10 + Ni/60 + 5B

Table 4 Typical mechanical properties of high fatigue property steel (Plate thickness : 25 mm)

Direction	Tensile test			Bending test (r = 1.5 t)	Charpy impact test	
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)		\sqrt{E}_{-40} (J)	$\sqrt{T_{fs}}$ (°C)
L	415	533	27	Good	205	-83
C	426	545	25	Good	156	-65
(IACS)	≥ 355	490-620	≥ 21	-	34 (L), 24 (T)	-

\sqrt{E}_{-40} : Absorbed energy at -40°C,

$\sqrt{T_{fs}}$: Fracture appearance transition temperature

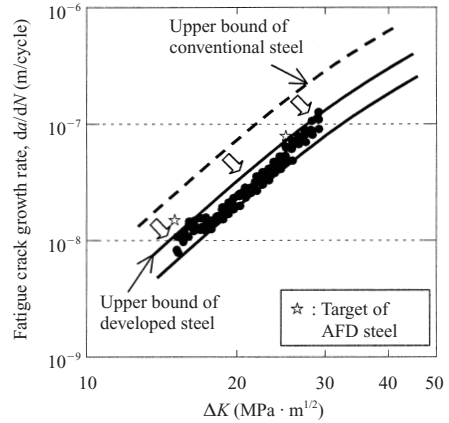


Fig. 9 Fatigue crack growth test result of high fatigue property steel

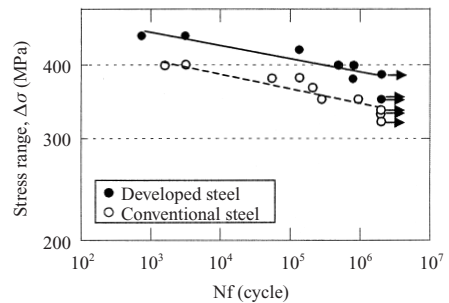


Fig. 10 Fatigue strength property

有していた。また、本開発鋼は従来材と同じ化学組成にて製造しているため、溶接施工性（溶接割れ性など）に関しても同等の性能を有していることが確認された。

3.3.2 疲労特性

ASTM E647 に基づく疲労き裂伝播試験の結果を Fig. 9 に示す。疲労き裂伝播試験は全厚のコンパクト試験片を用いて、室温・大気中にて行った。疲労き裂伝播速度は開発目標を十分に満足する良好な値を示し、Fig. 7 に示した従来鋼の範囲に比べて低き裂伝播速度側に伝播性能を安定させようことを確認した。

Fig. 10 に開発鋼と従来鋼の疲労強度試験の結果を示す。開発鋼の疲労強度は上述したミクロ組織の微細化による強度上昇に見合った疲労強度の向上が確認された。

3.4 疲労設計の現状と

疲労き裂伝播シミュレーション

船舶の疲労強度評価を行う際には、就航 20 年に相当する 10⁸ 回の応力変動の繰返しに対する累積疲労被害度で評価されてきた。疲労強度を評価する際の船舶の状態は、満載状態とバラスト状態における通常航行状態であり、ホットスポット応力変動幅の長期頻度分布と S-N 線図から線形累積被害則により行うのが現在でも通常の手順である。

この累積疲労被害度による評価では、き裂発生に関するおおよその寿命は比較的簡易に予測可能であるが、一度発生した疲労き裂からき裂伝播量を予測し、余寿命判定（次

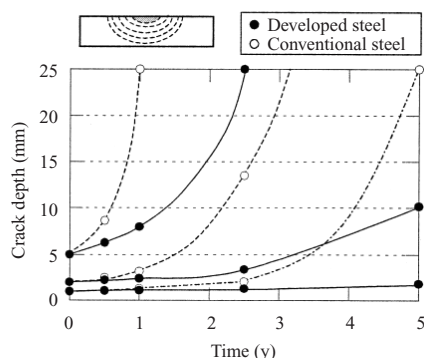


Fig. 11 Simulation of fatigue crack growth under service condition

回ドック検査まで就航継続可能かどうか)を行うことには適用できない。

これに対し、SR245 では各船舶の設計から運航まで一貫した指標を用いることによるトータルライフでの安全性向上を目的として「先進的な疲労寿命監視法」と「そのための手法・ツール」を提案^{3,7)}している。疲労寿命監視システムでは個別船舶の就航中の遭遇海象をモニタリングシステムにより特定し、その遭遇海象履歴と設計・製造過程での材料特性を含めた疲労強度データを使用して、船体構造部材の疲労状況を追跡、把握し、き裂伝播解析によるき裂長さを尺度として余寿命評価を行う。ここでは、そのSR245 提案の手法を用いて、日本・ペルシャ湾間の航路での遭遇荷重履歴の一例を使ったき裂貫通寿命のシミュレーションを行い、表面き裂状欠陥を有する平板部材の貫通寿命に及ぼす鋼板の疲労き裂伝播特性の影響を比較した。解析結果を Fig. 11 に示す。従来鋼、開発鋼ともに疲労き裂伝播試験結果の平均値から求めた係数を用いた Paris 則⁸⁾ を使って伝播解析を行っている。開発鋼は従来鋼に比べ良好な疲労き裂伝播性能を有しており、貫通寿命で比較すると 2 倍以上の長寿命化が期待される。

4. おわりに

船舶の LCC 低減のニーズに対応し、当社は腐食の面では原油タンカー上甲板用耐食鋼 NAC5 を、疲労の面では高疲労特性鋼板 AFD を開発した。NAC5 は現用鋼と比較して耐食性が約 10% 向上し、プライマー寿命を約 2 倍にする。両方の効果を合わせて、上甲板の減耗による切替が必要となる船齢を 5 年延長すると予測される。NAC5 はすでに実船 4 隻に採用され、運用されている。また、AFD は疲労き裂の伝播寿命を 2 倍以上にすることができるとともに疲労強度の向上も図られており、船舶の安全性向上へ

Table 5 JFE スチールの造船用厚板

各船級協会規格	NK ABS LR, DNV 他各船級船体構造用軟鋼/高張力鋼 低温用鋼など
大人熱溶接用鋼板	JFE-EWEL
テーパー鋼板	JFE-LP
タンカー用耐食鋼板	JFE-NAC5
耐疲労鋼板	JFE-AFD

NK : Nippon Kaiji Kyokai, ABS : American Bureau of Shipping, LR : Lloyd's Register of Shipping, DNV : Det Norske Veritas

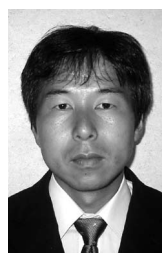
の寄与が期待される。

JFE スチールでは今後もさらなる高機能化・高付加価値化に寄与する Only 1, No. 1 商品の開発を推進し、船舶の安全性向上を含め社会の発展に貢献していく所存である。当社で製造する造船用厚板を Table 5 に示す。

末筆ながら、腐食に関する実船調査データのご提供をいただいた (株)商船三井殿に謝意を表する。

参考文献

- 1) 熊田誠. イナートガス・システムによるオイルタンクの防食と腐食事例. 第 41 回腐食防食討論会講演集. 腐食防食協会. 1994, p. 357-360.
- 2) 第 242 研究部会 原油タンカーの新形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) 第 245 研究部会 二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究成果報告書. 日本造船研究協会. 2003
- 4) 山本規夫. 腐食衰耗に関する最近の調査結果とその強度検討. 「構造シンポジウム 損傷に学ぶ」テキスト. 日本造船学会. 2001, p. 315
- 5) タンカーの構造強度に関するガイドライン. 日本海事協会. 2001
- 6) 第二世代 VLCC の損傷調査. 日本海事協会会誌. no. 245, 1998
- 7) 山本聡, 森川正夫. 日本造船学会講演論文集. no. 2, 2003, p. 21-22
- 8) Paris, P.; Erdogan, F. Trans. of the American Soc. of Mechanical Engineers. 1963-12, p. 528-534.



伊木 聡



猪原 康人



平井 龍至