

受賞技術－30

衝突安全性を確保する船体用高延性厚鋼板

Highly-Ductile Steel Plates for Shipbuilding Securing Crashworthiness

市川和利 日本製鉄(株) 技術開発本部
鉄鋼研究所 厚板・形鋼・鋼管研究部
主幹研究員**

Kazutoshi Ichikawa

1 背景と目標

船舶の衝突事故による甚大な人的、物的および環境的な被害は依然として後を絶たない。2017年度の一般財団法人日本海事協会 (ClassNK) 船級船海難事故発生の要因としても、「衝突・接触・座礁」が47%と最多を占めている (図1)¹⁾。日本製鉄株式会社では、これまで船舶の安全性向上に取り組み、衝突安全性やアレスト (ぜい性き裂停止性能) 技術の開発など、高機能厚鋼板の開発を進めてきたが、現在、海上交通の安全・安心のために最も取り組むべき課題は、このような衝突や座礁事故に対する船舶の性能向上である。特に船舶の衝突による油漏洩は深刻な環境被害とそれに伴い、貴重な海洋生態系破壊をもたらす。1987～2009年の海難審判庁裁決録によれば日本沿岸だけでも約7000件/年の衝突事故が発生している²⁾。最近でも、表1³⁾に例を示すように、深刻な船舶の衝突事故が発生している。

特に41,000トンもの原油を流出した1989年のエクソン・ヴァルデズ号の事故を契機に、原油タンカーからの原油流出による海洋汚染が大きな問題となり、1993年にInternational Maritime Organizationは船舶事故による海洋汚染防止のために原油タンカーのダブルハル化 (二重船殻化) を義務づけた。ダブルハル化により、油漏洩は減少してはいるものの、依然、皆無にはならず、海洋環境保護に対する関心の高まりから、ダブルハル化の衝突対策だけでは不十分との指摘があった。そこで、ダブルハル化に加えて、荷油タンク区画の増加 (図2) や隔壁幅の拡大 (図3) などの構造変更による安全性の向上が検討されていた。ところが、これらの対策は施工コストの増大や船体重量の増加による輸送速度の低下、荷

油体積の減少による輸送効率の低下を招き、オペレーションコストが増大する。結果として、これらの構造的対策は地球温暖化の防止にも反する上に、船主や造船所の負担は甚大であり、有効かつ経済的な代替手段の開発が期待されていた。

このような状況で、海洋国家日本の果たすべき役割は極めて重大である。そこで、日本製鉄株式会社 (以下、日本製鉄) では、このような船体構造の変更ではなく、衝突や座礁による船舶の損傷を軽減する材料技術が経済合理性に適切であると発想した。日本製鉄は、具体的に、延性 (伸び) に優れた鋼板を被衝突船の船体構造に適正に配置することで、鋼板で衝突エネルギーを吸収し、船舶の耐衝突性能を高める技術が、現実的に衝突安全性を高めるための唯一の方策であると、方針決定し、船体用高延性厚鋼板 (NSafe[®]-Hull) の開発、実船適用を目指した。すなわち、経済合理性も考慮して、施工・検査の負荷を増加させる船体構造の設計変更ではなく、「従来の伸び規定値の1.5倍」を有する厚鋼板を開発した。日本製鉄はこの鋼板の実用化に際し、海上・港湾・航空技術研究所と今治造船株式会社との共同研究も実施した。その後、普及を目指すため、鋼船規則への取込みも視野に入れ、2014年にClassNKも共同研究に参画した。これらの共同研究も踏まえ、最新の製鉄技術にて、従来鋼に対し、非常に高い延性を有し、高いエネルギー吸収能を有する、全く新しい船体用高延性厚鋼板を実用化した。

2014年には世界で初めて船体用高延性厚鋼板を適用した大型ばら積み運搬船が就航した。2016年にはClassNKより、世界で初めて、高延性鋼の材料承認を取得し、当該船には衝突に対するエネルギー吸収に効果のある高延性鋼を適用した船舶として認証 (Class Notation) がClassNKより、付与さ

* 第66回 (令和元年度) 大河内記念生産賞受賞：日本製鉄株式会社、「衝突安全性を確保する船体用高延性厚鋼板製造技術の開発」

** 現 東北大学 工学研究科 特任教授

れた。その後、船体用高延性厚鋼板を適用した船舶が数多く就航し、2019年には船体用高延性厚鋼板を適用した世界初のVLCC（超大型原油タンカー：Very Large Crude-oil Carrier）の建造が始まった。

船体用厚鋼板で衝突安全性を高める方法としては、図4に示すように、①強度向上と、②延性向上の2つの方法が考えられる。しかしながら、①では、鋼材の靱性を損ない、また溶接性などを犠牲にせざるを得ない。日本製鉄では、②で衝突時の吸収エネルギー（図4の応力-ひずみ曲線で構成される面積に対応）を増加させることで安全性を改善した。

ここでは現実的な衝突安全性を満足できる伸びの値を工学的に定めた。船体のような海上の大型構造物で衝突実験を行うことは困難であるので、有限要素法（FEM：Finite

Element Method）により必要な厚鋼板の伸びを決定した。ここで、伸びはClassNKの「鋼船規則K編材料」⁴⁾に規定さ

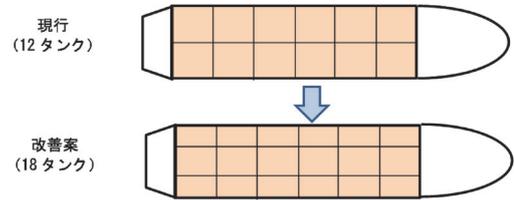


図2 損傷時の油漏洩の軽減のための荷油タンク数の増大を示す模式図(平面図)

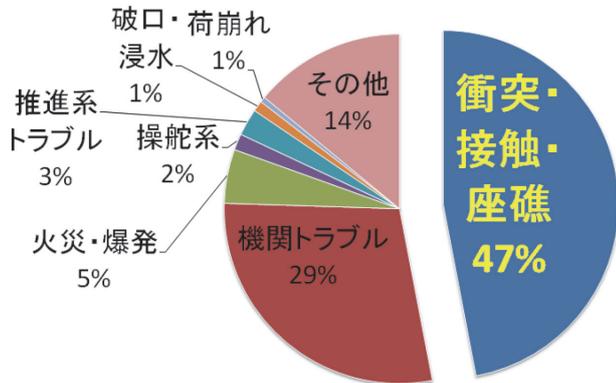


図1 日本海事協会船級船海難事故の要因(2017年度)¹⁾

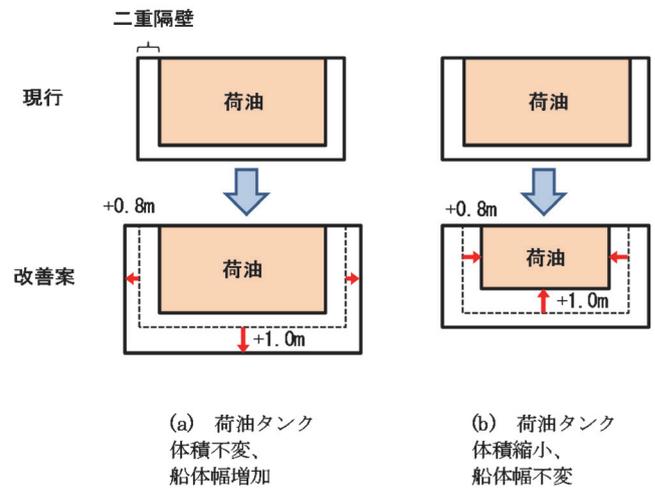


図3 ダブルハル(二重隔壁)の隔壁幅の拡大方法を示す模式図(横断面図)

表1 最近の船舶の重大衝突事故の例(参考文献3)の事案に加筆)

発生日	場所	概要	人的、物的および環境被害など
2011年12月14日	韓国、釜山沖	ばら積み運搬船とコンテナ船が衝突	ばら積み運搬船の残存強度不足のため、その後の台風で2つに分断
2014年3月18日	浦賀水道付近	貨物船どうしが衝突	1隻沈没。乗組員7名が死亡。2名が行方不明。油が流出し、富津市に漂着
2016年1月16日	東京湾川崎沖	タンカーと砂利運搬船が衝突	荷油が流出
2016年7月15日	姫路市沖	石炭貨物船と砂利運搬船	船長ら2人死亡
2016年8月7日	京浜港扇島沖	タンカーどうしが流出	荷油(軽油)が流出
2017年1月28日	インドのKamarajar港沖	LPGタンカーと石油タンカーが衝突	大量の油を流出。ウミガメの生態系や漁業に影響
2017年6月17日	伊豆半島沖	アメリカ海軍イージス艦フィッツジェラルドとコンテナ船が衝突	乗組員7名が死亡
2017年8月21日	シンガポール沖	アメリカ海軍イージス駆逐艦ジョン・S・マケインと石油タンカーが衝突	乗組員10名が死亡
2018年1月14日	上海沖の東シナ海(日本の排他的経済水域)	石油タンカーと貨物船が衝突	タンカーで火災が発生。乗組員32名が行方不明。奄美大島に油が漂着
2018年10月7日	フランス コルシカ島沖	貨物船どうしが衝突	海洋保護区に燃料油が漏出
2018年11月8日	ノルウェー北部	ノルウェー海軍イージス艦とタンカーが衝突	イージス艦から航空燃料が漏出。イージス艦は沈没を避けるために浅瀬で着底。8名負傷

れた値(表2)の1.3、1.4および1.5倍を仮定した。被衝突船であるVLCCの船側部に対し、速度 V_B の衝突船B(満載状態のVLCCを仮定)が衝突するシミュレーションをFEMにて行った。衝突角度(衝突船Bの速度ベクトルと被衝突船Aの船長方向のなす角)は 90° とし、 V_B は12ノット(約22km/h)で計算した。ここで、海上交通安全法施行規則(昭和48年3月27日運輸省令第9号)で制定された日本における航路内の最大速力制限であること、山田と金湖による海難事故審判庁採決録に基づく船舶の衝突速度の考察において、最も頻度が高い衝突速度が10~11ノットである²⁾ことなどから、仮定した12ノットの衝突速度は、十分に厳しい衝突条件である。

FEMの計算結果の一例を図5に示す⁵⁾。伸びが規定値(表2)の1.3倍では、船体を縦断するき裂が認められるが、1.4倍や1.5倍では、そのようなき裂は認められない。このような結果に基づき、伸び規定値の1.5倍を開発目標として設定した。

2 開発の内容と特徴

伸びが高いほど安全性は向上するが、伸びは強度とトレードオフの関係にあって、強度と伸びの両立は非常に難度が高い。船体用高延性厚鋼板の開発では、従来のTMCP(Thermo-Mechanical Control Process、熱加工プロセス)技術を進化させて、強度は維持したまま延性を向上させた。

日本製鉄は、局部伸びの改善のために、製鋼工程において

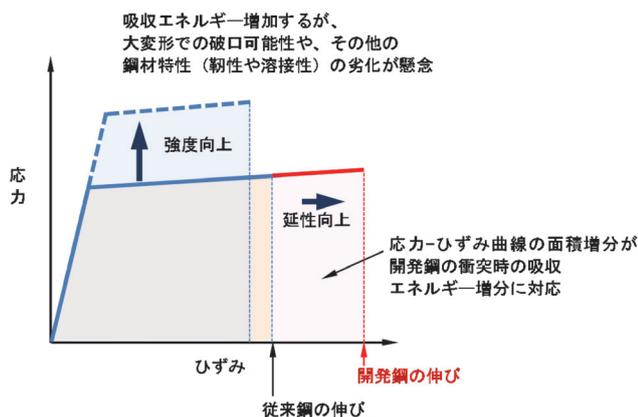


図4 衝突安全性を改善するための応力-ひずみ曲線の2つの考え方

は、不純物元素の低減処理並びに介在物除去を強化して、高純度の溶鋼の提供を図った。転炉型溶銑予備処理プロセス(MURC法: Multi-Refining Converter法)の適用を含めた製鋼プロセスの最大限の活用により、不純物元素の低減と介在物削減と生産性を両立した。この高い製造実力を最大限活用することで、船体用高延性厚鋼板の溶鋼の生産と環境負荷低減の両立を可能にした。

さらに延性改善のために軟質なマトリクスを生成する成分系と、強度確保のために、組織を微細化し、硬質第二相を最適超微細に分散させたマイクロ組織を実現するための化学成分の最適化と厚鋼板製造技術の開発を行った。TMCP技術を革新して、厚板製造における要素技術のひとつである冷却技

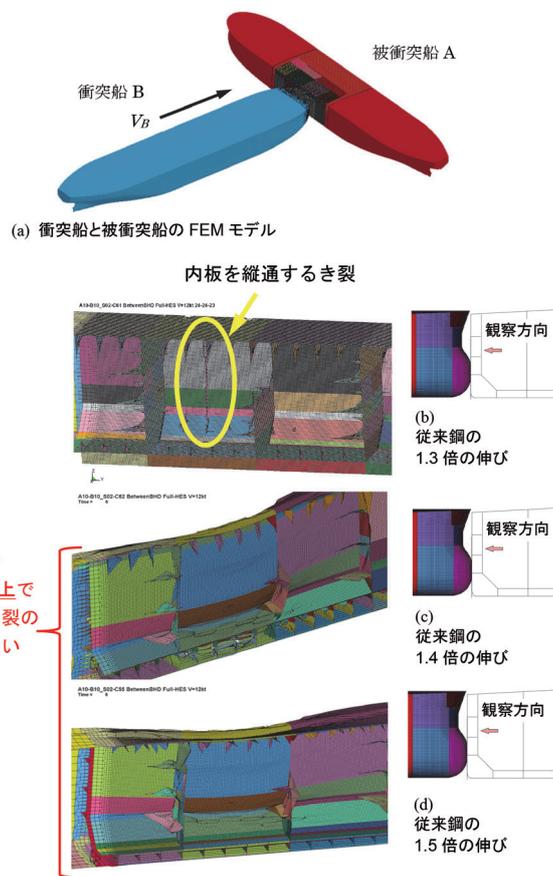


図5 VLCCの衝突安全性のための必要伸びの有限要素法(FEM)による決定(タンク内部からの視野)

表2 ClassNK 鋼船規則K編材料に規定された伸びの最小値⁴⁾(単位: %、U1号試験片)

材料記号	降伏点 又は 耐力 (N/mm^2)	厚さ t (mm)							
		$t \leq 5$	$5 < t \leq 10$	$10 < t \leq 15$	$15 < t \leq 20$	$20 < t \leq 25$	$25 < t \leq 30$	$30 < t \leq 40$	$40 < t \leq 50$
KA, KB, KD, KE,	235	14	16	17	18	19	20	21	22
KA32, KD32, KE32, KF32	315								
KA36, KD36, KE36, KF36	355	13	15	16	17	18	19	20	21
KA40, KD40, KE40, KF40	390	12	14	15	16	17	18	19	20

術の高度化を具現化するため、新冷却設備も採用した。目標温度に対する実績温度の精度や温度偏差を極限まで狭レンジで制御する仕上圧延工程と水冷工程におけるプロセス技術も開発し、さらにそれを大量生産で安定して合理的、効率的に実現するアルゴリズムも開発した。

商業生産された船体用高延性厚鋼板の応力-ひずみ曲線の例を従来鋼と比較して、図6⁶⁾に示す(板厚35mm)。船体用高延性厚鋼板は従来鋼(ClassNK規則の降伏強度36kg/mm²級鋼)と同等の強度を有しながら、著しく優れた延性(同規則の約1.5倍の伸び)を有し、商業ベースで提供可能である。

船体用材料として本鋼を適用するためには、溶接性など、母材の伸び以外の特性は従来鋼と同等である必要がある。本鋼ではTMCP技術の革新により、炭素当量の低減も従来のTMCP鋼と同様に、例えばClassNK規則の降伏強度36kg/mm²級鋼の場合で、0.38mass%以下を実現しているうえに、大入熱溶接の溶接熱影響部の中でも最も厳しい温度履歴を受けるボンドにおいても150Jを超える高い吸収エネルギーを示しており⁶⁾、船体用高延性厚鋼板は十分な大入熱溶接熱影響部靱性を含む溶接性も有している。

従来鋼と船体用高延性厚鋼板の衝突安全性をFEMを用いて比較した⁷⁾。ここではVLCCの船体構造に、ClassNK規則相当の伸びを有する従来鋼と船体用高延性厚鋼板を適用した2つの場合で被衝突時の損傷状況の比較を行った。解析条件は図5の場合と同等である。図7に、VLCCに各々、従来鋼と船体用高延性厚鋼板を使用した場合の荷油タンク内側から見た(図7(c))被衝突後の破口の発生状況を示す。従来鋼の場合には大きな破口が生じているが(図7(a))、船体用高延性

厚鋼板を適用した場合には大きな破口は生じていない(図7(b))。

FEMに加えて、船舶の衝突を模擬した溶接部を含んだ大型構造モデル試験も新たに考案し、船体用高延性厚鋼板の破口抑制効果を実験的に検証した⁸⁾。この試験では、圧縮試験機定盤に試験体を設置し、衝突船先端部を模擬した押し込み治具を、試験体外板側より試験体中心部に準静的に押し込んだ。図8に各構造モデル試験体の損傷状況を示す。船体用高延性厚鋼板の試験体では顕著な破口は生じておらず、試験体の広範囲が塑性変形している。一方、従来鋼の試験体では、骨材の溶接止端部より発生したき裂が外板を貫通し、試験の終了時点ではき裂が大きく開口していた。これより、船体用高延

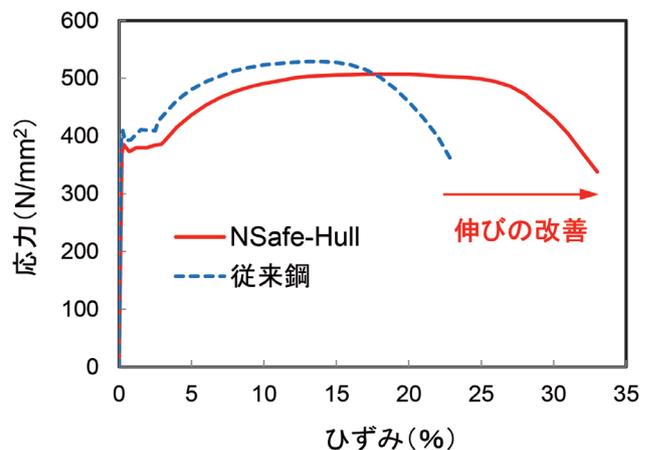


図6 従来鋼と船体用高延性厚鋼板NSafe[®]-Hullの応力-ひずみ曲線の比較例⁶⁾

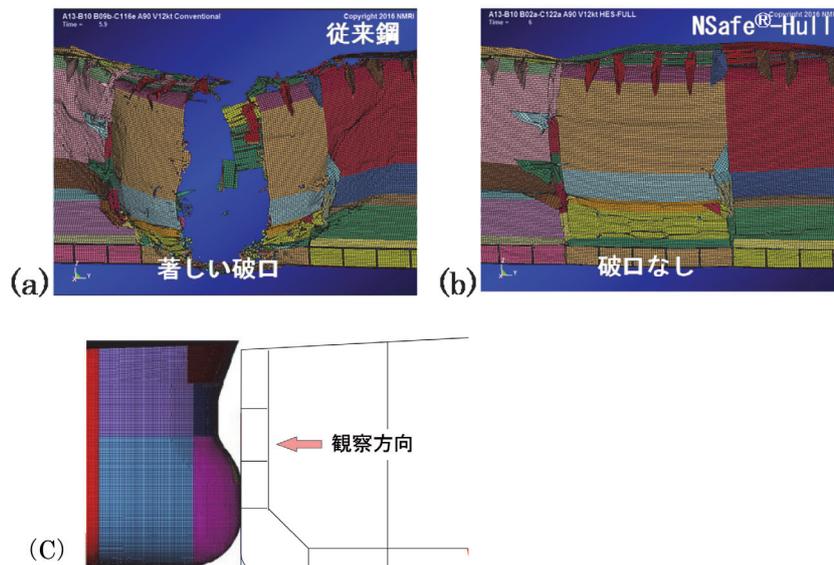


図7 被衝突船に各々、(a) 従来鋼と(b) 船体用高延性厚鋼板NSafe[®]-Hullを使用した場合の被衝突船VLCCの損傷状況の比較例。(c) 観察位置(被衝突船タンク内側からの視野)、参考文献⁷⁾中の図に一部加筆、編集

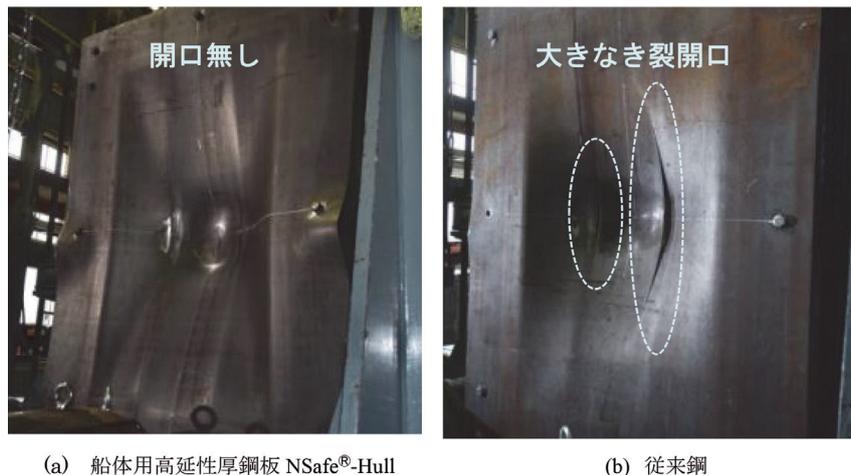


図8 大型構造モデル試験体の損傷状況(外側)⁸⁾

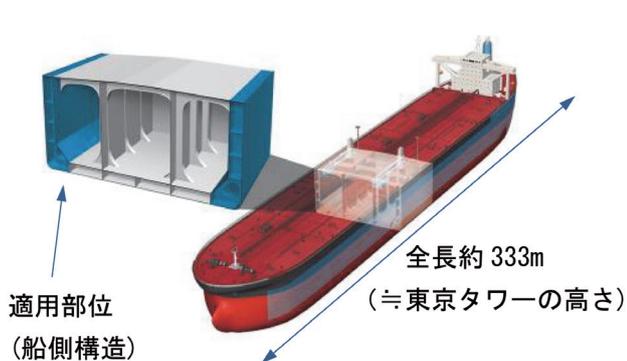


図9 船体用高延性厚鋼板 NSafe®-Hull 適用部位の例

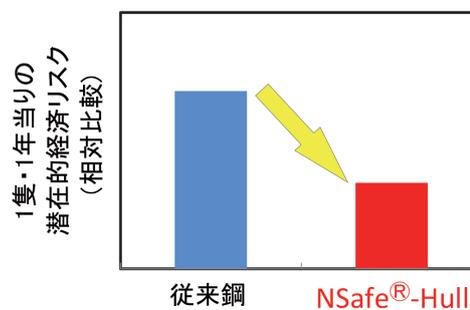


図10 従来鋼と船体用高延性厚鋼板 NSafe®-Hull を適用した船舶 (VLCC) の潜在経済リスク比較⁹⁾

性厚鋼板の衝突時の破口抑制と構造安全性向上効果が実験的にも実証された。

3 成果

日本製鉄の船体用高延性厚鋼板は、ClassNK より、KD36-HD50等の材料承認を取得した。これは高延性鋼を個別に承認し、従来の材料記号に“HD X”を付与するものである(“X”は規則要求値に対する伸び向上率(%)を示す)。ClassNKはこのような船体用高延性厚鋼板を適用した船舶に、Class Notation “Hull Protection by Highly Ductile Steel”の付記を認めている。同様な規定は、ClassNKに追従し、ABS船級(アメリカ)でも制定され、今後、本鋼は世界的デファクトスタンダードになるであろう。

船体用高延性厚鋼板はその思想が評価されて、VLCC(図9) 8隻への採用も決定しており、予定も含め、累計31隻の船舶に計約5万トンの高延性厚鋼板が使用されている。環境保護強化が叫ばれる中、出荷量は更に拡大するであろう。

海洋油流出に伴う経済損失は甚大である。例えば、ナホトカ号油流出事故(1997年)では、被害請求額は356億円を超えているが、船体用高延性厚鋼板を使用すれば、このような経済的損失の大幅な低減が可能である。例えば、船体用高延性厚鋼板による経済損失抑制効果を統計に基づいて算定した結果から、1隻のVLCCが1年間に潜在的に抱える経済的損失リスク(相対値、(隻・年)⁻¹)は船体用高延性厚鋼板を使用することにより半減することができる(図10)⁹⁾。このようなリスク低減効果も認められて、国交省告示第356号(2019年3月15日)にて「高延性鋼」が環境負荷の小さい「先進船舶」の技術要件として認定され、租税特別措置法施行令等の一部を改正する政令に基づき、税制優遇される。このような工学的、経済的に合理的な根拠に基づき、税金、保険料、入港料などが低減できれば海運産業におけるメリットは極めて大きい。

船体用高延性厚鋼板は国連の「持続可能な開発目標」(SDGs: Sustainable Development Goals) にも関しても、例えば特に、「目標14. 持続可能な開発のために 海洋・海洋資源を保全し、持続可能な形で利用する」に貢献する。

4 結言

船舶の衝突や座礁により、生じる油流出が招く海洋環境破壊の影響は甚大である。これは、最近、2020年7月25日（現地時間）にモーリシャス沖で発生したばら積み運搬船の座礁により、大量の重油が流出した事案をみても明らかである。本記事で紹介したNSafe[®]-Hullを船舶に適用すれば、船舶の安全性の向上が可能であり、経済的にも、国際競争の渦中にある日本の造船産業の受注競争力強化に貢献に資する。このような鉄鋼高機能商品の実用化の成功は日本の製造現場における、ものづくりの基礎体力が結実した成果でもある。

今回の大河内記念生産賞受賞も契機にこのような高機能鋼を採用した先進船舶への理解と採用が広まり、船舶からの油流出にともなう環境破壊のない世界の実現に貢献できれば幸いである。

5 謝辞

船体用高延性厚鋼板の開発と実用化および本解説記事の執筆にあたり、多大なご協力とご指導を賜りました国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所の山田安平殿、戸澤秀殿、今治造船株式会社の紙田健二殿、一般財団法人日本海事協会（ClassNK）船津裕二殿およびこれら各位の所属機関の多数の方々から謝意を表します。また、本高機能鋼の実際の製造と商品化に際しては、日本製鉄の厚板事業部、九州製鉄所大分地区、厚板・形鋼・鋼管研究部および九州技術研究部の各位の多大なる尽力により実現いたしました。

参考文献

- 1) 日本海事協会会誌, 日本海事協会技術研究所編, (2018) 322, 139.
- 2) 山田安平, 金湖富士夫: 日本船舶海洋工学会講演会論文集, (2013) 17,175.
- 3) 市川和利, 大川鉄平, 山田安平, 紙田健二, 船津裕二: 溶接学会誌, 87 (2018) 4,238.
- 4) 日本海事協会: 鋼船規則 K編 材料 (2016) .
- 5) 発明者 市川和利, 稲見彰則, 白幡浩幸, 山田安平, 戸澤秀, 檜垣幸人: 特許第5893231号, 出願日2015年5月26日.
- 6) 大川鉄平, 市川和利, 柳田和寿, 白幡浩幸, 稲見彰則, 石田浩司, 山田安平, 稲井智明: 新日鉄住金技報, (2014) 400, 31.
- 7) 市川和利, 大川鉄平, 白幡浩幸, 柳田和寿, 中島清孝, 小田直樹, 山田安平, 戸澤秀, 紙田健二, 船津裕二: まてりあ, 57 (2018) 1,14.
- 8) T.Okawa, K.Ichikawa, H.Shimanuki, S.Nakamura, N.Oda and Y.Yamada : Developments in the Collision and Grounding of Ships and offshore Structures, Editor : C. Guedes Soares, CRC Press, Taylor & Francis Group, (2020), 34.
- 9) Y.Yamada, H.Ochi and K.Ichikawa : Developments in the collision and Grounding of Ships and offshore Structures, Editor : C. Guedes Soares, CRC Press, Taylor & Francis Group, (2020), 364.

(2020年11月30日受付)