

第3回 日本オープンイノベーション大賞 国土交通大臣賞受賞

海洋油濁防止のための 耐衝突・座礁性に優れた 高延性厚鋼板の開発・実用化 ～人命と積み荷を保護する先進船舶～

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所
海難事故解析センター センター長
日本製鉄株式会社 上席主幹（東北大学 特任教授）
一般財団法人日本海事協会 官公庁船事業部 主任技師

やまだ やすひら
山田 安平
いちかわ かずとし
市川 和利
ふなつ ゆうじ
船津 裕二

1. はじめに

近年、環境問題に対する社会の関心はますます高まっており、船舶からの油流出リスク低減は、造船・海洋分野において重要な課題の一つとなっている。

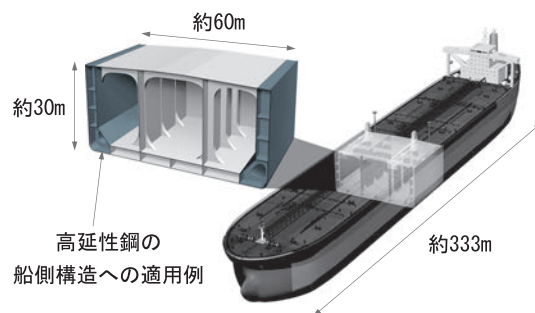
海上保安庁の統計データ¹⁾（海上保安庁，2020年）によると、衝突及び座礁事故は、タンカーの海難事故原因のそれぞれ1位，3位を占めており、海洋環境汚染防止及び船舶安全上、重要な課題の一つである。海難事故原因の2位は、機関故障である。機関故障した場合、漂流し、結果として、座礁・衝突の海難となるリスクも高い。積荷が原油や危険物の場合、衝突・座礁により乗員の生命が危険にさらされる上に、貨物が海洋に流出し、甚大な海洋環境汚染を生じる可能性もあり、社会的・経済的な損失になる。

このようなタンカーからの油流出事故を防止するために、国際条約により、油タンカーの船側構造は二重構造（ダブル・ハル）とすることが義務付けられている。しかしながら、2001年，バルト海のデンマーク沖で二重船側構造の原油タンカー Baltic Carrier が他船に衝突される事故が発生

した。衝突によりタンカーの船側に大きな破口を生じ、油流出により付近の沿岸に甚大な海洋環境汚染をもたらした。

このように二重構造であっても、大型で高速航行する船舶が衝突した場合には、油流出が生じる可能性がある。油流出による海洋汚染は、生態系の破壊、漁業被害、観光被害等をもたらす。

衝突防止のためには、レーダー等の先進的な航海機器等によって衝突回避をすることが「一次防護策」である。しかしながら、海難事故統計の実態のとおり、ヒューマンエラー等により衝突事故を100%防ぐことは難しく、「二次防護策」（フェイルセーフ）として、万一、衝突・座礁が発生した場合にも、環境汚染被害を最小限とする対策を



図－1 超大型原油タンカーへの高延性鋼の適用例（模式図，日本製鉄株式会社ホームページをもとに編集）

講じておくことが重要である。

2. 高延性鋼の研究開発の経緯、問題意識

(1) これまでの研究開発

二重船側構造が国際条約で義務付けされてから、船舶からの大規模油流出を防止するためにさまざまな研究開発が行われてきた。1990年代には、我が国で船側構造を強化（高張力鋼適用等）する研究が行われた。しかしながら、大型で高速航行する船舶が衝突する時、被衝突船の船側構造強化のみで衝突船の運動エネルギーを全て吸収することは難しいことが分かってきた。

そこで、被衝突船のみでなく、衝突船の船首構造でもエネルギーを吸収する「緩衝型船首構造」に関する研究が実施された。緩衝型船首構造の採用により、衝突時のエネルギー吸収量は増加し、破口発生リスクを一定程度低減できることが分かった。しかし、自船船首を変形させてエネルギーを吸収するコンセプトは、修理費増大のイメージと結びつくためか実用化例は少ない。

(2) 高延性鋼開発プロジェクト

前述のような研究開発経緯に加え、衝突船だけでなく、被衝突船でエネルギーを吸収し、かつ、設計変更による造船所への負担が少ない方策として、新材料を用いた方法を被衝突部に採用することとした。従来、油等危険物を運搬する船舶が、自船の構造安全性を確保することが多かったことも、開発の動機である。

過去20～30年間の研究で、船舶の衝突被害軽減のための研究開発対象が、被衝突船から、いったん衝突船に移り、再度、被衝突船に移り変わってきたこととなり、非常に興味深い。船体の構造様式変更によるエネルギー吸収の場合、設計・建造の工数増加や、建造後の検査負荷の増大等も懸念され、結果として、材料変更によるエネルギー吸収量の増加が原点に立ち返った解決策の一つであったとも考えられる。

20年前には発想しえなかった、もしくは、実

現が難しかった技術が、最近の製鉄技術の進歩もあり、現在では実現可能になったことも今回の研究開発の成功の鍵の一つである。

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所、日本製鉄株式会社、今治造船株式会社及び一般財団法人日本海事協会（以下、「NK」という）は、共同研究²⁾により、タンカーからの油流出防止及び耐衝突強度向上の観点から、日本の最先端製造技術を駆使し、新鋼材「高延性厚鋼板」(以下、「高延性鋼」という)を開発するプロジェクトを実施した（日本製鉄における商品名：NSafe®-Hull）。開発コンセプトを以下に示す。

〈高延性鋼の開発コンセプト〉

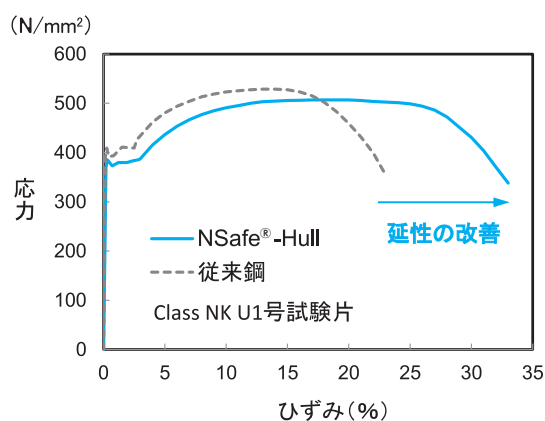
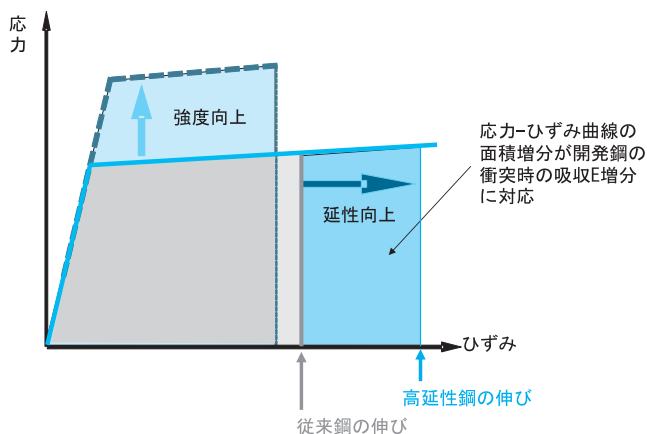
- ① 船側構造の破口発生の遅延・抑制
- ② 強度・溶接性は従来鋼と同等以上
- ③ 国際ルール（船級規則）に適合
- ④ 構造設計の変更不要
- ⑤ 実現可能なコスト意識

溶接性など加工性も従来鋼と同等（材料の置換のみで衝突安全性の向上を実現）である。この高機能新鋼材の性能や適用実績等について、次章以降で紹介したい。

3. 高延性鋼の特性・効果

高延性鋼は、規則（国際基準）で要求される強度性能を維持したまま、従来の鋼板に比べて1.5倍以上の伸び性能を有することが最大の特徴である（図－2、3）。

高延性鋼を船側構造に適用することにより、衝突による船側構造の破口による油流出や浸水のリスクを低減する効果がある。海上・港湾・航空技術研究所で実施したコンピュータ・シミュレーション例²⁾(図－4～6)により、特定の超大型原油タンカー（以下、「VLCC」という）どうしの船体中央部への真横90度衝突において、高延性鋼を船体に用いることにより、荷油タンクの破口の発生までに吸収するエネルギーが従来鋼に比べて増加し（図－7）、破口発生リスクを低減できるとの推定結果が得られた。



エネルギー吸収量の増加は、「貨物油タンクに破口が発生するまで」のエネルギー吸収量であることが重要な点である。図-7のエネルギー吸収量増大は、材料の伸び増大に伴う、破口発生タイミングの遅延ならびに塑性化域の拡大の相乗効果による。高延性鋼の効果は、数値計算だけでなく、2,000トン大型試験装置を用いた大型構造模型実験でも検証されている³⁾(大川ら, 2019。写真-1)。

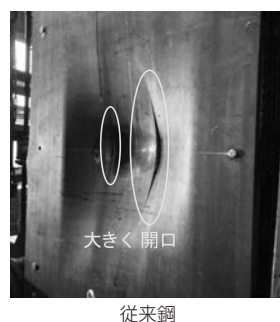
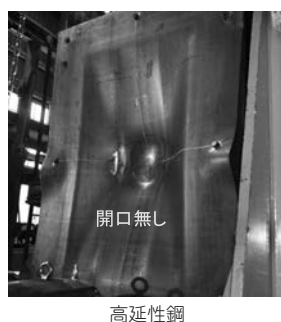


写真-1 大型構造模型による検証実験結果³⁾(大川ら, 2019)

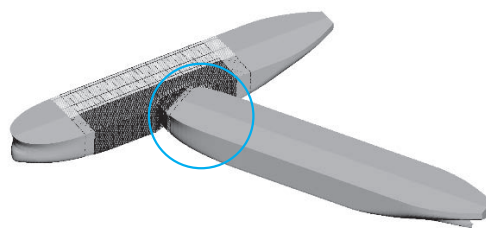


図-4 実船衝突シミュレーション例

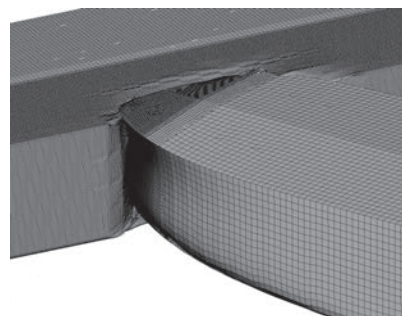


図-5 実船衝突シミュレーション例（衝突部の拡大）

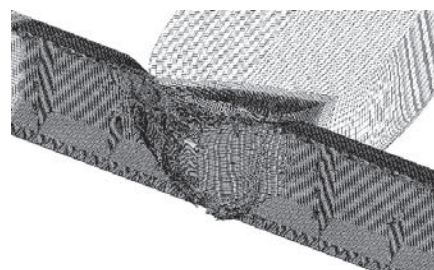


図-6 実船衝突シミュレーション例
(破口状況、被衝突船一部非表示)

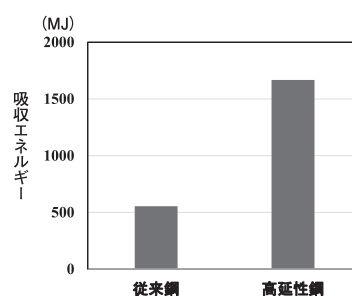


図-7 荷油タンク破口発生までに被衝突船で吸収したエネルギーの比較（今治造船ほか, 2016）

4. 高延性鋼に係る規則・ガイドライン

(1) 概 況

今回のプロジェクトにおいては、造船会社、製鉄会社のみでなく、船舶の材料を承認するNKが開発当初からプロジェクトに参加し、開発後、スムーズに規則改正やガイドラインを発行できたことが実用化促進につながったと考えている。本章では高延性鋼に係る規則及びガイドラインについて記載する。

(2) 高延性鋼の種類

NKは、規則で船体に使用する鋼材性能を規定している。高延性鋼は、従来の規則の伸びの最小値（表－1）に対する改善伸び性能として、3種類のグレード、「HD20」、「HD35」、「HD50」が設定された。それぞれ、従来規則で要求される伸びの最小値の20%増、35%増、50%増を有することを表す。NSafe[®]-Hullは高延性鋼として、これら3種類のグレードの中で最も伸び性能が高いHD50の材料承認を取得している。

(3) ガイドライン発行の経緯

高延性鋼の適用は、2014年竣工の30万トン級ケーブサイズ鉱石運搬船（パナマ運河やスエズ運河の通過可能サイズを超える大型船、船長×幅×深さ：291.9×50.0×24.7m）が最初である。以降、NKでは個別の船舶ごとに承認し、船級符号を付与してきたが、高延性鋼は船舶の安全性の向上に効果的と考えられることから、2020年に本材料の使用に関するガイドラインを発行し、より高延性鋼を利用しやすくした。

本ガイドラインは、承認のために高延性鋼の適用部位や伸びのグレードを定めたものであり、その適用は任意である。

(4) 要求される機械的性質

表－2に船体に使用される通常の鋼材の材料記号と機械的性質を示す。高延性鋼は前述のように、今回新設した3グレードの伸び規則を除き、引張試験や衝撃試験に関わる値は通常鋼と全く同じである。船級におけるKA～KEの強度は、溶接構造用圧延鋼材（JIS G3106）のSM400に、KA36～KF36は同SM490に、KA40～KF40

表－1 高延性鋼の3種類のグレード

降伏強度	材料記号（A級鋼の例）			
	従来鋼	高延性鋼（対従来鋼の伸び増分）		
		（20%）	（35%）	（50%）
24キロ級（235 N/mm ² ）	KA	KA-HD20	KA-HD35	KA-HD50
32キロ級（315 N/mm ² ）	KA32	KA32-HD20	KA32-HD35	KA32-HD50
36キロ級（355 N/mm ² ）	KA36	KA36-HD20	KA36-HD35	KA36-HD50

表－2 船級規則で要求される機械的性質の抜粋

材料記号	降伏点又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び(従来鋼 / 高延性鋼)*1 (%)	シャルピー衝撃 試験温度 (℃)	シャルピー衝撃試験 最小平均吸収エネルギー*4 (J)
KA, KB, KD, KE	235 以上	400-520	19/28.5 以上	*2	27
KA32, KD32, KE32, KF32	315 以上	440-590	19/28.5 以上	*3	31
KA36, KD36, KE36, KF36	355 以上	490-620	18/27.0 以上		34
KA40, KD40, KE40, KF40	390 以上	510-650	17/25.5 以上		39

* 1 NKU1号試験片（JIS 1B相当）による。

* 2 Aは衝撃試験は要求されない。B：0℃，D：-20℃，E：-40℃で衝撃試験を実施。

* 3 A：0℃，D：-20℃，E：-40℃，F：-60℃で衝撃試験を実施。

* 4 採取方向が圧延方向

は同 SM520 に相当する。

衝撃試験に関しては、JIS が、例えば、C シリーズ（高靱性型）で B シリーズに比べ、0℃での高い吸収エネルギーを定めているのに対し、船級では材料強度レベルや板厚に応じ、-20℃、-40℃のように低温で試験を行い、吸収エネルギー自体は一定としている。

また、船級規格では板厚にかかわらず強度の規則は一定である。ここでは詳細は省略するが、板厚が 50 mm を超えると板厚に応じ、段階的に吸収エネルギーの最小値を高く設定している。伸び以外の機械的性質は NK で定める規則と同じであるため、適用に際し構造的な設計変更などは不要である。

(5) 適用範囲と船級符号への付記

高延性鋼は図－8 に示すように、貨物区域、燃料タンク（Fuel Oil Tank：FOT）、機関区域を適用対象としている。その場合、対象とする区域の前端から後端までの船側外板及び当該板に取り付けられる縦通肋骨もしくは横肋骨（二次部材）に使用しなければならない。また、ここでは省略するが、深さ方向についても規定を設けている。

船級符号への付記を要求する場合、高延性鋼の使用範囲を明示した構造図面を NK に提出して、承認を得なければならない。

本ガイドラインの適用を受けた船舶については、“Hull Protection by Highly Ductile Steel”（略号 HP-HDS）と伸び値を組み合わせた船級符号を付記する。例えば HP-HDS/C50/E35/F20 は、C（貨物区域に HD50）、E（機関区域に HD35）、F（燃料タンクに HD20）を使用していることを示している。

また、高延性鋼を使用している範囲について

は、船級登録原簿に注記として記載する。例えば “KA36-HD50 and -HD35 applied to side shell plating within E/R and cargo space including hold frames and side longitudinals.” などである。ガイドラインに関しては NK のホームページ（<https://www.classnk.or.jp/hp/ja/index.html>）からその他の規則類を含め無料で閲覧できる。

5. 「高延性鋼」使用船舶に対する税制優遇措置

高延性鋼を採用した外航船舶は、船舶の特別償却制度の対象として、税制優遇を受けられることとなっている（国土交通省告示第 356 号、平成 31 年 3 月 15 日付官報（号外第 49 号））。

税制優遇の要件としては二つのカテゴリーが存在し、① IoT システムを組み込んだ船舶、または②新材料等を組み込んだ船舶は、申請により「先進船舶」として認定されることが可能となっている。高延性鋼を使用した船舶は上記②に該当し、先進船舶として認定される。内航船の場合は、残念ながら、現状、高延性鋼採用による先進船舶としては認定されていない。

6. 高延性鋼の実船適用例（社会実装）

高延性鋼 NSafe[®]-Hull は 2014 年の初の実船適用以降、その環境・安全性能が船主や造船会社に評価されて、多数の船舶への適用が着実に進みつつある。スムーズな社会実装の背景には、今次プロジェクトがオープンイノベーションで実施されたことが大きく寄与していると考えられる。

すなわち、国立研究機関が解析を実施し、製鉄会社が材料の開発・製造を行い、船級協会（検査



図－8 高延性鋼の適用部位

機関)が材料承認し、造船所が「船主の了解を得て」船体に適用するという多機関の「共創」が重要であったと考える。

NSafe[®]-Hull は、内航船と外航船合わせて、これまで予定を含め 31 隻に採用されており、その中には極めて高い安全性が要求される VLCC も 8 隻含まれている。

当初、高延性鋼は事故時の環境影響の点から大型船を中心に採用されてきたが、近年は船体そのものの安全性の点からも採用が進んでいる。31 隻中の 7 隻は、内航船である。本稿では、VLCC 1 隻(写真-2)に加え、内航船 2 隻(写真-3, 4)、計 3 隻について紹介する。内航船 2 隻は、独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構



写真-2 船体用高延性鋼を採用した原油タンカー (VLCC)「BAGHDAD」(総トン数: 160,115 トン, 載貨重量: 310,000 トン, 正栄汽船株式会社提供)



写真-3 船体用高延性鋼を採用した石灰石運搬船「名友丸」(総トン数: 5,589 トン, 載貨重量トン数: 7,500 トン, 三洋海運株式会社提供, 共有船)



写真-4 船体用高延性鋼を採用した石灰石専用船「君鉄丸」(総トン数: 17,477 トン, 載貨重量トン数: 21,000 トン, 積載量: 20,000 トン, NS ユナイテッド内航海運株式会社提供, 共有船)

(JRTT) と他船主との共有船である。

石灰石運搬船「名友丸」(写真-3, 株式会社三浦造船所建造) は、JRTT と三洋海運株式会社との共有船である。石灰は、水と接触すると発熱を伴う激しい化学反応を生じるので、船体の破口による浸水は極めて危険である。したがって、万が一、衝突を受けても浸水リスクを低減することが可能になれば、安全性は向上する。

石灰石専用船「君鉄丸」(写真-4, 株式会社新来島どっく建造) も、高延性鋼を採用し、NK に登録されている。

7. 表彰式の模様

今回のプロジェクトに対し、第3回オープンイノベーション大賞 国土交通大臣賞を受賞することができた。受賞式は、2021 年 2 月 25 日東京都港区の虎ノ門ヒルズフォーラムで開催された。新型コロナウイルス感染症の影響により、昨年行われなかった第2回の受賞者と合同の授賞式であった。13 の賞があり、内閣総理大臣賞から始めて順番に賞状とトロフィーが贈呈された。井上信治 科学技術政策担当大臣も出席され、大変厳かで榮譽ある賞を受賞でき感無量であった(写真-5)。



写真－5 授賞式の様子

8. 高延性鋼の今後の展望

衝突・座礁による油流出事故により、美しい海洋環境が大量の油で汚染されている写真・映像を見るたびに、自然環境をこのように破壊してはならないと感じてきた。海洋環境保護及び船舶の耐衝突安全性向上の観点から、高延性鋼がさらに多くの船舶に適用されることが望まれる。

現状、高延性鋼は、主に、船側構造に適用され

ているが、耐座礁対策として、船底への適用も想定される。船側・船底の双方に高延性鋼を適用することにより、船体が高延性鋼により保護される比率が高まり、衝突・座礁によるタンカーからの油流出リスクが一層軽減し、海洋環境保全に寄与することが期待される。

一方、造船・海洋以外への準用も提案されている。2018年の関西国際空港連絡橋への船舶の衝突事故で示されたように、航路と交錯する橋梁では衝突被害低減対策が必要である。橋脚の周囲に設置される「緩衝工」は衝突船の運動エネルギーを吸収し、橋体の保護と衝突船舶の自航の維持により、海洋汚染や航路封鎖などの社会的影響を最小限に抑える。このような緩衝工に高延性鋼を適用することで、その性能向上に寄与することも期待されている⁴⁾(猪瀬, 2017)。

【参考文献】

- 1) 令和元年 海難の現況と対策, 海上保安庁, 2020 年
- 2) 新日鐵住金株式会社, 今治造船株式会社, 独立行政法人海上技術安全研究所, 一般財団法人日本海事協会, “衝突時の被害低減のための船体構造への高延性鋼(HDS)適用に関する研究” 研究成果報告書, 2016 年
https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/assets/pdf/report/2016/13-26_1.pdf
- 3) 大川, 市川, 島貫, 中村, 小田, 山田, “船体用高延性鋼 HDS の衝突安全性向上効果の実験検証”, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 29 号, pp.439-440, 2019 年
- 4) 猪瀬, “大型鋼構造物における破壊防止のための設計施工”, 第 231・232 回西山記念技術講座, 「破壊力学」の進展とインフラ・構造物の信頼性～安全, 安心を管理するフラクチャー・コントロール～, 2017 年