UDC 669 . 14 . 018 . 293 : 539 . 55

技術論文

被衝突安全性に優れた船体用高延性鋼の開発と実用化 (NSafe®-Hull)

Development and Adoption of Steel Plate (NSafeTM-Hull) for Shipbuilding with Improved Collision Safety

大川鉄平* Teppei OKAWA 稲見彰則 Akinori INAMI 市 川 和 利 Kazutoshi ICHIKAWA 石 田 浩 司 Kohji ISHIDA 柳 田 和 寿 Kazuhisa YANAGITA 山 田 安 平 Yasuhira YAMADA 白 幡 浩 幸 Hiroyuki SHIRAHATA 稲 井 智 明 Tomoaki INAI

抄 録

船舶の衝突や座礁による損傷,沈没は貴重な人命や資源を喪失させるだけでなく,大きな環境破壊にも繋がりかねない重大海難事故である。新開発の船体用高延性鋼(NSafe®-Hull)では優れた延性(伸び)を実現し,本鋼材を船体構造に適切に配置することにより,万が一船舶の衝突,座礁が発生したとしても損傷を抑制し,被害の大幅な軽減を可能にするものである。NSafe-Hull の開発思想及びその特性を紹介するとともに,実船への初適用の例並びにその効果を非線形有限要素法による衝突シミュレーションにて示した。

Abstract

Ship collision and grounding and subsequent damages and foundering are serious maritime accidents which may cause losses in valuable human lives and resources and environmental damages. Newly developed NSafeTM-Hull has excellent ductility (elongation), which enables to prevent fatal damages for ship structures even if ship collision or grounding occurs. Technical concepts and material properties of NSafe-Hull are described in the present paper. The world-first adoption of NSafe-Hull for the ship structure is reviewed and its effects are demonstrated through the collision simulation by nonlinear finite element method.

1. 緒 言

近年,船舶の海難事故件数は減少傾向が続いているものの,依然として多くの重大海難事故が後を絶たず,その中でも船舶の衝突,座礁は最も頻度が高い事故となっているり。船舶の衝突や座礁による損傷,沈没は貴重な人命や資源を喪失させるだけでなく,油漏洩等が生じれば,甚大な海洋環境汚染に繋がる可能性がある。そのため,衝突・座礁事故の発生防止対策が重要であることはもとより,万が一事故が発生した場合に備えた被害の軽減策を検討することが重要である。

衝突時の船舶の安全性向上に関する関心は世界的に見ても極めて高く,高弾性高分子材料 ("Core")を含むサンドイッチ鋼板システム ²⁾ や LNG (Liquefied Natural Gas) 船の隔壁に中空ガラス粉体を充填し、衝突時の応力を分散し、破口の発生を抑制する方法 ³⁾、LNG 船の側面に縦板を細かく

配置したサンドイッチパネルを設置し、タンクの破口を抑制することで衝突安全性を改善する試み 4) 等が提案されている。

上述のような異種材料の導入や構造変更ではなく、鋼材 そのものの特性を向上させることにより、船体重量や施工、検査の負荷を増加させずに、衝突や座礁による船舶の損傷 を軽減し得るアプローチが提案できれば、経済合理性の観点からも現実的方法であると考えられる。その一つとして、延性(伸び)に優れた鋼板を船体構造に適正に配置することで、鋼板にて衝突エネルギーを吸収し、船舶の耐衝突性能を高めることが想定される。すなわち、船体構造の船側・船底外板や燃料タンク周辺等に高延性鋼を配置することで、万が一衝突、座礁が発生したとしても船体の破口を抑制し、貨物倉内への浸水並びに貨物、油の流出を防止することができると考えられる。

このような考え方に基づき、新日鐵住金(株)では延性に

優れた高強度鋼板である NSafe®-Hull を開発した。本鋼材は今治造船(株),(独)海上技術安全研究所との共同研究において実船への適用を検討し、衝突シミュレーションを実施することでその効果を検証した。本論文では NSafe-Hull の開発思想及びその特性を紹介するとともに、実船適用と衝突シミュレーションの概要を示す。

2. 開発目標

鋼板の衝突エネルギー吸収能を高めるには、強度と延性の両方の特性が優れている必要がある。そこで、NSafe-Hull は、強度、靭性、溶接性は従来の造船用 KD36 鋼((財)日本海事協会(以後、NK)規則・検査要領)と同等を維持したまま、伸びを従来鋼に比べて著しく向上することを開発の目標とした。また、鋼板が船体構造の外板、内殻、骨材等に適用されることを想定し、板厚は最大で40mm、片面1パス溶接(入熱量20kJ/mm)に耐え得る溶接熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)靭性を有することとした。

3. 開発思想

一般に鋼材の強度と延性は相反する関係にあり、通常両立することは難しい。また、引張試験により測定される伸びは、一様伸びと局部伸びに分けることができるが、それらは支配因子が異なる。一様伸びの向上には、軟質相(フェライト)と硬質相(第二相)からなる複合組織とすることが有効がであり、各相の体積分率を適正化することでさらに特性を高めることができるの。また、フェライトの細粒化強化は延性に対する悪影響が比較的小さい強化機構であることが知られているで、一方、局部伸びの向上には、板厚方向の硬さ分布の均一化、第二相や非金属介在物(以後、介在物)の微細分散等が有効である 8.9%。

本開発鋼(NSafe-Hull)では、化学成分の適正化とTMCP(Thermo Mechanical Control Process)技術の活用により、フェライトと第二相の組織分率を最適化し、かつ第二相を微細分散させるミクロ組織制御を行うことで、高強度と高延性の両立を可能にした。さらに、不純物元素であるSを極力低減するとともに介在物制御を行うことで、延性破壊のボイドの起点となり得る粗大介在物を排除し、伸びのばらつきを低減した。TMCP技術の活用は、炭素当量(Ceq)及び溶接割れ感受性組成(P_{CM})の低減にも寄与しており、十分な溶接性と溶接 HAZ 靭性を確保した。

4. NSafe-Hullの特性

4.1 母材特性

表1に NSafe-Hull の機械的性質の例を示す。引張試験には NK Ul 号試験片を使用した。NSafe-Hull (板厚 35mm)の応力 - ひずみ曲線の例を図1に示す。NSafe-Hull は従来鋼 (KD36) と同等の強度でありながら、著しく優れた延性を有している。NSafe-Hull は、TMCPプロセスにおける加熱、

表 1 NSafe-Hull の機械的性質例 Examples of mechanical properties of NSafe-Hull

		Tensile properties			
Ctool	Thickness	Yield	Tensile	Elamantian	
Steel	(mm)	point	strength	Elongation	
		(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	
A	11	410	517	30	
В	18	389	508	33	
С	26	384	509	32	
D	35	381	505	33	
NK KD36	10-40	≥355	490-620	≧16	

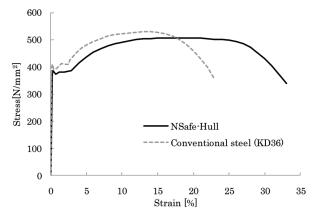


図1 応力 - ひずみ曲線の例 Examples of stress-strain curves

圧延,及び冷却の条件を厳格に管理することで,材質ばらつきを低減し,強度と延性に優れた鋼板を安定的に製造することが可能である。

4.2 大入熱継手特性

NSafe-Hull の大入熱継手特性を評価するため、表2の溶接条件にてエレクトロガスアーク溶接を実施し、シャルピー衝撃試験にて溶接継手部の靭性を評価した。溶接材料はNK 船級認定 0.05C-0.25Si-1.6Mn-1.4Ni-0.13Mo (mass%)系市販フラックス入りワイヤ (1.6mm $\phi)$ を使用した。写真1に継

表2 溶接条件 Welding conditions

-	Thickness	Groove	Root	Welding	Voltage	Welding	Heat
(mm)	angle	gap	current	(V)	speed	input	
	(°)	(mm)	(A)	(v)	(mm/min)	(kJ/mm)	
_	35	20	9	380	39	45	20

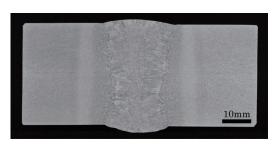


写真1 継手マクロ組織 Macrostructure of weld joint

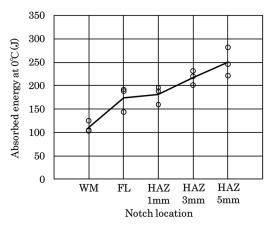


図2 継手シャルピー衝撃試験結果 Charpy impact test results of weld joint

手マクロ組織, 図2に試験結果をそれぞれ示す。FL (Fusion Line) 位置においても 150J を超える高い吸収エネルギーを示しており、NSafe-Hull は十分な大入熱溶接 HAZ 靭性を有している。

5. NSafe-Hullの実船適用とシミュレーションによる効果の検証

NSafe-Hull は、今治造船にて建造されたばら積み船(船主: (株)商船三井)に初適用され、2014年8月2日に進水を行っている(写真2)。NSafe-Hull が適用された船舶の概要を表3に示す。図3に示すように、船側外板に加えて、トッ



写真2 NSafe-Hull 初適用船 (ばら積み船) の進水 Launch of the bulk carrier with the world-first adoption of NSafe-Hull

プサイドの燃油タンク部と機関室の燃油タンク部に NSafe-Hull が適用された。表4に NSafe-Hull の適用部材とその期待効果を整理したが、船側外板への適用により、側面衝突時に破口の発生を抑制し、貨物倉内への浸水を防止し、貨物の保護が可能になるとともに、港湾での船内作業車の打撃による船側鋼板の破断の防止効果なども期待できる。また燃油タンク部への NSafe-Hull の適用により、万が一、この部位に衝突を受けた際に破口の抑制効果が発揮され、環境に深刻な被害をもたらす油流出の防止に寄与する。

NSafe-Hull の適用が、被衝突船の耐衝突強度及び吸収 エネルギーに与える影響についての評価一例を示す。図4

表3 NSafe-Hull 初適用船 (ばら積み船) の概要 Outline of the bulk carrier with the world-first adoption of NSafe-Hull

Deadweight	206 600 tons	
Length	299.94 m	
Breadth	50.00 m	
Depth	24.70 m	
Shipping company	Mitsui O.S.K. Lines, Ltd.	
Shipbuilding yard	Saijo Shipyard,	
Shipounding yard	Imabari Shipbuilding Co., Ltd.	
Launch	2nd August, 2014	
Amount of NSafe-Hull used	Approximately 3 000 tons	

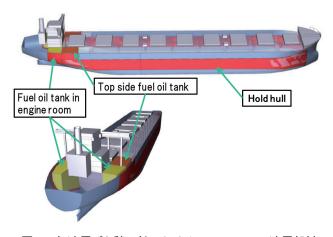


図3 初適用ばら積み船における NSafe-Hull の適用部材 (今治造船提供)

Overview of parts for which NSafe-Hull is world-first used (courtesy of Imabari Shipbuilding Co., Ltd.)

表4 NSafe-Hull 適用部材と期待効果 Parts for which NSafe-Hull is applied and its expected effects

Positions	Details of parts applied	Effects expected	
	· Side shell plating	· Prevention of flooded cargo holds	
Hold single hull	· Hold Frames	· Protection of cargo	
	· Side longitudinal stiffeners	· Prevention of penetration by loading machine grab strike	
	· Side shell plating	· Prevention of oil spill	
Top side fuel oil tanks	· Topside tank bottom plating	· Prevention of penetration by loading machine grab strike	
Top side fuel on tanks	· Fuel oil tank longitudinal bulkhead		
	· Side longitudinal stiffeners		
Fuel oil tank in engine room	· Side shell	· Prevention of oil spill	
	· Fuel oil tank longitudinal bulkhead		



図4 船舶の側面衝突(模式図) Ship side-collision (schematic)

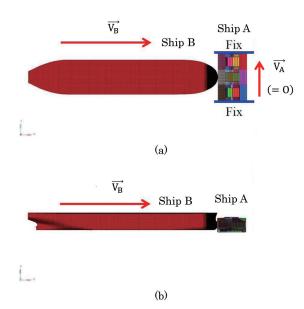


図5 ばら積み船への側面衝突モデル (海上技術安全研究所 提供) (a) 平面図, (b) 正面図

Side-collision model for bulk carrier (courtesy of National Maritime Research Institute) (a) Plan view, (b) Front view

に仮想した衝突の模様を模式的に示す。ここでは、図5(a)の平面図と図5(b)の正面図に示すように、速度ベクトルマーを有する被衝突船であり、本研究にて NSafe-Hull の適用を検討する対象であるばら積み船 A の船側部に対し、速度ベクトルマーの衝突船 B (大型油タンカーを仮定) が衝突するシミュレーションを非線形有限要素法解析(Nonlinear Finite Element Method, 以後, FEM)にて行った。このシミュレーションでは被衝突船 B では船体中央近傍の3区画のみを仮定し、前後端(図5(a)中に"Fix"と示した位置)を固定条件として計算した(これは被衝突船にとって安全側の仮定である)。図6に使用した被衝突船 B を船側部斜め上方から見たモデルの俯瞰図を示す。

図7の赤色で示した船側外板の一部の部材をNKの規則・検査要領相当の伸びを有する一般鋼を適用した場合とNSafe-Hullを適用した場合で、破口の状況の相違を比較し

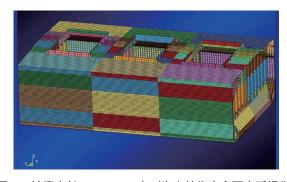


図6 被衝突船の FEM モデル(海上技術安全研究所提供) FEM model of struck ship used (courtesy of National Maritime Research Institute)

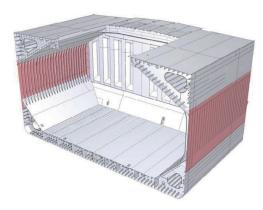


図7 NSafe-Hull 適用部材(船側外板の一部,図の赤色部分, 今治造船提供)

Sectioned view of parts for which NSafe-Hull is used (parts in red)

た。 $\overrightarrow{v_A}$ と $\overrightarrow{v_B}$ のなす角は90°とし、すなわち $|\overrightarrow{v_B}|$ は衝突速度であり、 $|\overrightarrow{v_A}|$ =0ノットである。 $|\overrightarrow{v_B}|$ は12ノットにて計算した。12ノットを $|\overrightarrow{v_B}|$ として想定したのは、これが海上交通安全法施行規則(1973年3月27日運輸省令第9号)で制定された我が国における航路内の最大速力制限であること並びに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ノットであること 100 による。したがって衝突速度として12ノットを仮定すれば、合理的に十分に高いと考えられることから、 $|\overrightarrow{v_B}|$ =12ノットを想定して計算を行った。

側面衝突時の被衝突船の安全性を評価する定量的指標として,限界衝突速度を用いた。限界衝突速度は,破口発生までに船体運動以外で吸収したエネルギー E_{cr} を用いて,以下の式から求めることができる 11 。

$$v_{B,cr} = \sqrt{2E_{cr} \frac{M_A + M_B}{M_A M_B}}$$
 (1)

ここで、 M_A と M_B はそれぞれ、被衝突船と衝突船の付加水質量込み排水量である。被衝突船は前後端隔壁で固定条件であることから、 M_A が十分に大きいので、 $M_A \rightarrow \infty$ と仮定すれば、式 (1) は以下のように近似できる。

$$v_{B,cr} = \sqrt{\frac{2E_{cr}}{M_p}}$$
 (2)

 E_{cr} を FEM で計算することにより、式 (2) に従って、 $v_{B,cr}$

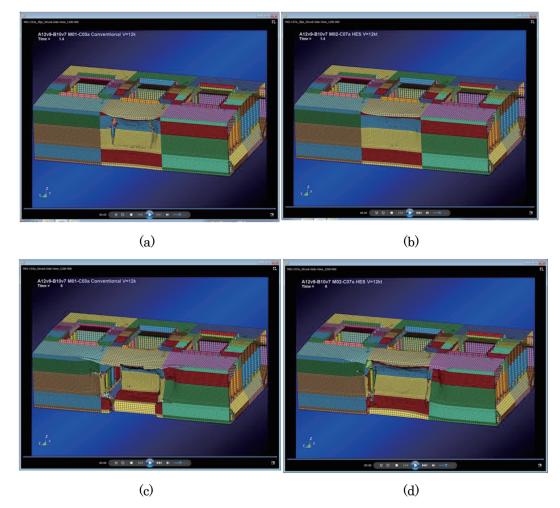


図8 船側外板に一般鋼と NSafe-Hull を用いた場合の 12 ノット衝突時の被衝突船の損傷状況の FEM による比較(海上技術安全 研究所提供)(a)衝突 1.4 秒後,一般鋼の場合,(b)衝突 1.4 秒後, NSafe-Hull の場合,(c)衝突 6 秒後,一般鋼の場合,(d)衝突 6 秒後, NSafe-Hull の場合

Comparisons of damage in struck (at 12 knots) ship with conventional steel and NSafe-Hull in hull structure (a) 1.4 seconds after collision with conventional steel, (b) 1.4 seconds after collision with NSafe-Hull, (c) 6 seconds after collision with conventional steel, (d) 6 seconds after collision with NSafe-Hull

を求めた。

まず, 衝突後の時間の経過に伴う, 被衝突船の損傷状 況の変化の FEM 計算の結果を示す。船側外板に一般鋼を 使用した場合には、12 ノットで衝突後、1.4 秒で縦方向の 大きな破口が認められる図8(a)に比べ、NSafe-Hullを使用 した場合には、同時刻までに明らかな破口は認められない (図8(b))。衝突船 B が被衝突船 A に対して、ほぼ静止し た最終状態では(衝突後6秒後),この衝突速度では船側 外板に一般鋼を使用した場合には、き裂が船底部にまでお よび、被衝突船の損傷が著しいことがわかった(図8(c))。 それに比較して NSafe-Hull を使用した場合には、破口が軽 微で損傷が軽減されていることがわかる(図8(d))。破口 が軽減できれば、衝突破口時の浸水を軽減し、ひいては船 舶の沈没の危険性を低減させることにもつながると期待さ れる。本解析では船体中央部の貨物倉船側部に衝突した場 合を想定しているが、船尾部の燃料油タンクに衝突した際 には、開発鋼はタンクの破口を抑制し、油漏洩の抑制にも 寄与する効果も発揮すると想定される。

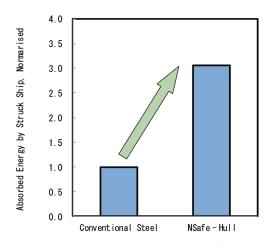


図9 被衝突船による吸収エネルギーの比較(一般鋼の場合を1として正規化)

Absorbed energy by struck ship, normalised by value of case with conventional steel

図9に解析の結果得られた被衝突船による船側外板破口 発生までの吸収エネルギーの比較結果を示す。図7に赤色 で示した部材に NSafe-Hull を適用した場合を規則相当の伸

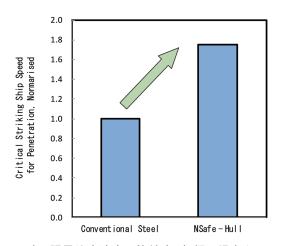


図 10 破口限界衝突速度の比較(一般鋼の場合を1として 正規化)

Critical striking ship speed for penetration, normalised by value of case with conventional steel

びを有する一般鋼を適用した場合と比較すると、船側外板破口発生までの吸収エネルギーは約3倍に向上することがわかった。同様に限界衝突速度を比較すると、図10に示すように1.75倍に向上することがわかった。

以上のように、強度と延性に優れた NSafe-Hull を船体構造に適切に配置することにより、万が一船舶の衝突が発生したとしても、それによる損傷を大幅に軽減し得ることが確認された。

6. 結 言

強度と延性に優れた造船用鋼板 NSafe-Hull を開発した。 NSafe-Hull は従来鋼(KD36)と同等の強度でありながら、 著しく優れた延性を有しており、かつ十分な溶接性と大入 熱 HAZ 靭性を備えている。NSafe-Hull を船体構造に適切 に配置することにより、万が一船舶の衝突が発生したとし ても船体の破口を抑制することが可能であり、衝突シミュ レーションにてその効果を確認した。

今後は、NKの"業界要望による共同研究"スキームに

よる支援を受け、さらに高度な解析を実施していく予定である。また、NKでは、本船のように安全性を高めた船舶に対し"ノーテーション(識別表示)"を付与し、船舶の安全性向上を推進することを検討している。

新日鐵住金は、NSafe-Hullの幅広い船舶への適用を通じて、今後とも安全で確実な海上輸送の実現に貢献していく。

謝辞

NSafe-Hull の実用化に際し、多大なるご協力を賜りました海上技術安全研究所の戸澤秀研究統括主幹と今治造船丸亀事業本部船体設計グループの紙田健二グループ長に心から謝意を表します。

参照文献

- 1) 海上保安庁:海難の現況と対策について. 2012
- Nataro, G. et al.: Proceedings of 6th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ICCGS. Trondheim, Norway, 17-19 June, 2013, p. 85
- Schöttelndreyer, M. et al.: Proceedings of 6th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ICCGS. Trondheim, Norway, 17-19 June, 2013, p. 101
- Rudan, S. et al.: Proceedings of 6th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ICCGS. Trondheim, Norway, 17-19 June, 2013, p. 331
- 5) 新日本製鐵(株): 鉄の薄板・厚板がわかる本. 2009
- 6) 寺田好男 ほか: 新日鉄技報. (380), 76 (2004)
- 7) 辻伸泰:鉄と鋼. 88 (7), 359 (2002)
- 8) 内山郁 ほか:鉄と鋼. 57 (13), 1897 (1971)
- 9) 小指軍夫: 鉄と鋼. 61(14), 2998 (1975)
- 10) 山田安平 ほか:日本船舶海洋工学会講演会論文集. (17), 175 (2013)
- 11) Yamada, Y. et al.: International Journal of Offshore and Polar Engineering. 18 (2), 1 (2008)



大川鉄平 Teppei OKAWA 大分技術研究部 主任研究員 工博 大分県大分市大字西ノ州1番地 〒870-0992



市川和利 Kazutoshi ICHIKAWA 鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部 主幹研究員 Ph.D.



柳田和寿 Kazuhisa YANAGITA 大分製鉄所 品質管理部 厚板管理室



白幡浩幸 Hiroyuki SHIRAHATA 大分技術研究部 主幹研究員



稲見彰則 Akinori INAMI 厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室 主幹



石田浩司 Kohji ISHIDA 大分製鉄所 品質管理部 厚板管理室長



山田安平 Yasuhira YAMADA (独)海上技術安全研究所 構造安全評価系 構造解析研究グループ 上席研究員 工博



稲井智明 Tomoaki INAI 今治造船(株) 丸亀事業本部 船体設計グループ 船体設計第一チーム 係長