

船舶の衝突安全性に資する 包括的材料ソリューションの開発

市川和利^{*1)} 大川鉄平^{*1)} 白幡浩幸^{*1)} 柳田和寿^{*2)}
 中島清孝^{*3)} 小田直樹^{*3)} 山田安平^{*1)*} 戸澤 秀^{*2)*}
 紙田健二^{***} 船津裕二^{****}

1. 緒 言

重大海難事故の中で船舶の衝突・座礁は最も頻度が高い事故である⁽¹⁾。これらの事故による損傷・沈没は貴重な人命や資源を喪失させ、油漏洩等が生じれば、甚大な海洋環境汚染にも繋がるので、事故が万が一発生した場合の被害軽減策が世界的関心事項である。船体構造への非金属材料⁽²⁾⁽³⁾の導入や構造変更⁽⁴⁾ではなく、鋼材特性の向上により、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手法は経済合理性の観点からも現実的である。具体的には、伸びに優れた鋼板を被衝突船や衝突船の船体構造に適正に配置すれば、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できる。

新日鐵住金株式会社(以降、新日鐵住金)は、今治造船株式会社(以降、今治造船)、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所の海上技術安全研究所(以降、NMRI)、一般財団法人 日本海事協会(以降、ClassNK)と連携して、船舶の衝突安全性に対する包括的船体材料ソリューションを提案している。

その一環として、新日鐵住金では永年の開発を経て、船体用高延性鋼 NSafe[®]-Hull(以降、本鋼)を開発した。新日鐵住金、今治造船と NMRI との共同研究による衝突シミュレーションで本鋼の効果を検証し、実船に適用した。

加えて、世界の衝突事故による被衝突船の損傷を最小限に抑えるためには、衝突船の安全性能も高めることが必要なので、衝突船の球状船首(バルバスバウ)用鋼材と構造に関しても、開発・実用化を行っている。

本論文では、このように、船舶の衝突安全性を向上させ、海洋環境を保護することを目的として船側部と船首部を包括して材料設計し、確立した材料ソリューションを紹介する。

2. 開 発 思 想

鋼板の衝突エネルギー吸収能を高めるには、その強度と延性の両方が優れている必要がある。本鋼では従来の船体用圧延鋼材(ClassNK 規則・検査要領)と同等の強度、靱性を有しつつ、伸びを従来鋼に比べて著しく向上させた。

一般に鋼材の強度と延性は相反し、それらの両立は難しいが、高強度鋼のよう伸びの向上には、軟質相であるフェライトと硬質第二相からなる複合組織とすることが有効であり、各相の体積分率を適正化することで特性を高めることができる⁽⁵⁾。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⁽⁶⁾。さらに局部伸びの向上には、板厚方向の硬さ分布の均一化、第二相や介在物の微細分散などが有効である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。本鋼では、化学成分適正化と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マイ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、Sを極力低減するとともに介在物制御により、延性破壊のポ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技術の活用により、炭素当量及び溶接割れ感受性組成を低減し、大入熱溶接熱影響部靱性を含む十分な溶接性を確保した。

3. NSafe[®]-Hull の特性

表1に本鋼の機械的性質の例を示す。引張試験にはNK U1号試験片を使用した。本鋼(板厚35 mm)の応力-ひずみ

* 新日鐵住金株式会社；1)主幹研究員，2)主査，3)主幹

** 海上・港湾・航空技術研究所；

1)海難事故解析センター 副センター長，2)研究特命主管

*** 今治造船株式会社；執行役員

**** 日本海事協会；プロジェクトマネージャー

Development of Holistic Solution to Improve Crashworthiness of Ships; Kazutoshi Ichikawa*, Tepei Okawa*, Hiroyuki Shirahata*, Kazuhisa Yanagita*, Kiyotaka Nakashima*, Naoki Oda*, Yasuhira Yamada**, Shigeru Tozawa**, Kenji Kamita*** and Yuji Funatsu**** (*Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. **National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. ***Imabari Shipbuilding CO., LTD.. ****ClassNK)

2016年10月17日受理[doi:10.2320/materia.56.30]

表1 NSafe®-Hull の機械的性質例.

鋼	板厚(mm)	降伏点(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	伸び(%)
A	11	410	517	30
B	18	389	508	33
C	26	384	509	32
D	35	381	505	33

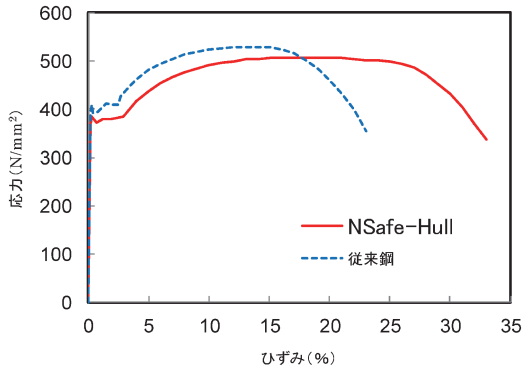


図1 NSafe®-Hull と従来鋼の応力-ひずみ曲線の例.

曲線の例を図1に示す. このように本鋼は従来鋼(KD36)と同等の強度と著しく優れた延性(従来 ClassNK 規則の約1.5倍の伸び)を有する. 本鋼は既に商業製造技術を確立されており, TMCPの加熱, 圧延および冷却条件の厳格管理により, 小さな材質ばらつきで強度・延性に優れた鋼板の安定製造が可能である.

4. NSafe®-Hull の耐衝突特性解析と実船適用例

ここでは, ばら積み船に本鋼を適用した場合の被衝突船の吸収エネルギーと破口に至る限界衝突速度に与える効果の例を示す. 停止したばら積み船の船側部に対し, 大型油タンカーが速度12ノット, 衝突角度90°で衝突するシミュレーションを非線形有限要素法解析で行った. 船側外板の一部の部材を ClassNK の規則・検査要領相当の伸びを有する従来鋼と本鋼を適用した2つの場合で破口状況を比較した. なお, 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)で制定された我が国における航路内の最大速力制限が12ノットであることや, 山田と金湖による解析による「頻度が高い」船舶衝突速度は10~11ノットであること⁽⁹⁾を鑑み, 解析条件として, 十分に高い衝突速度12ノットを仮定した.

解析の結果, 船側部材の一部に本鋼を適用した場合を規則相当の伸びを有する従来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. この吸収エネルギーから求められた, 定量的指標である限界衝突速度⁽¹⁰⁾を比較すると, 1.75倍に向上する(図2). 実際の船舶の「平均」衝突速度は統計的に4.27ノットであること⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を考えれば, この図で示した5ノットを超える限界衝突速度は有意なレベルである. なお, 同様にして, VLCC(Very Large Crude oil Carrier)に本鋼を適用した場合の効果も検証されており, 適用部位最適化により,

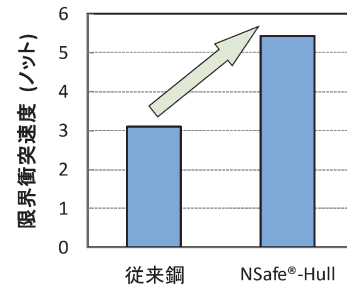


図2 破口限界衝突速度の比較例.



図3 NSafe®-Hull 初適用ばら積み船の進水.

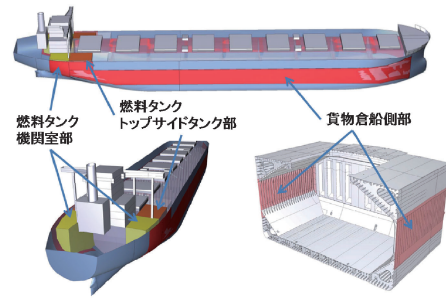


図4 初適用ばら積み船における NSafe®-Hull の適用部材(赤色部分).

VLCCが12ノット90°衝突しても外・内殻の破口は生じないことを示している⁽¹³⁾.

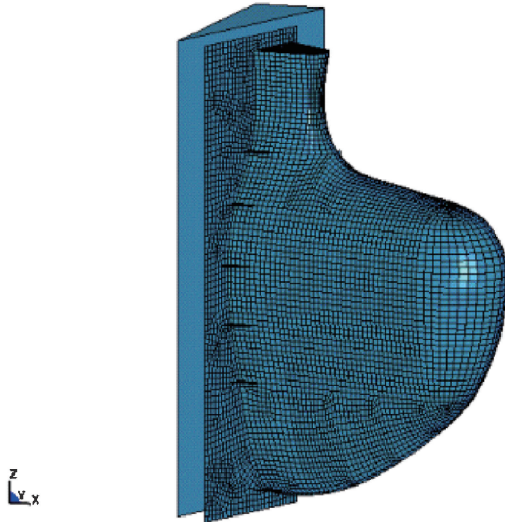
本鋼は, 今治造船建造のばら積み船に初適用され, 2014年8月に進水した(図3). 図4に示す部位に本鋼を適用することにより, 側面衝突時の破口発生を抑制し, 貨物倉内への浸水防止と貨物保護や沈没の危険性の低減が可能になる. また, 燃料油タンク部への適用により, 衝突時の油流出防止にも寄与する.

本研究の一部は, ClassNK「業界要望による共同研究」スキームの研究支援により実施され, 新日鐵住金では既にこの高延性鋼に関し, ClassNK の材料認証「Particulars of Approval」(例えば, 従来の規則要求の1.5倍の伸びを有するKA32-HD50など)を得た. また, 本鋼を適用した上述のばら積み船に対し, 衝突や座礁に対するエネルギー吸収に効果のある鋼を適用した船舶に付記される ClassNK の「Notation」を取得した.

5. 衝突安全性が高い球状船首の開発と実用化

新日鐵住金は極低炭素, 高純度化と最新の圧延技術により, 球状船首向けに特に変形能力の高い鋼材(NS-Ship-

(a) BB-E-72deg-slide (LY204,Longi removed)
Time = 0.0099995



(b) BB-E-72deg-slide (LY204,Longi removed)
Time = 1.2

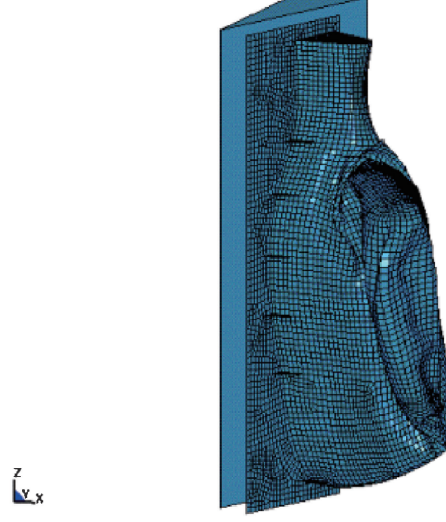


図5 衝突時の球状船首の変形解析例(海上・港湾・航空技術研究所提供), (a)衝突前, (b)衝突後.

Safety235)を開発し, 今治造船はこれを活用し, 47000 t プロダクトタンカーに「セーフティーバウ」として採用した⁽¹⁴⁾.

この鋼は従来鋼の1.5~2 倍の伸びを有し, 衝突時の球状船首の変形により衝突エネルギーの吸収が大きい. なお, この鋼材開発を発端として, 上述のNSafe[®]-Hull の開発にも繋がっている. また, セーフティーバウは加工硬化が小さいため, 衝突時の被衝突船に与える圧迫力が小さいので, 万が一, 衝突した場合でも被衝突船の損傷が小さい.

NMRI の協力で実施した衝突シミュレーション(例, 図5)で従来に比べ, 被衝突船への圧迫力は50%程度も低下し, 破口も縮小する結果を得た. NS-Ship-Safety235 の製造および適用も ClassNK 承認を得ている.

6. 結 言

船体構造に高延性鋼を適切に配置することにより, 衝突時の船体の破口を低減することが可能な包括的材料ソリューションを提案・実用化した. すなわち,

- (1) 従来鋼と同等の強度, 著しく優れた延性, 十分な溶接性を備えた船体用高延性鋼 NSafe[®]-Hull を開発, 実用化した.
- (2) 球状船首向けに変形性能の高い鋼材 NS-Ship-Safety235 を開発, 実用化した.

これらの技術は例えば参考文献(15)-(24)に示すように, 特許登録査定されている. NSafe[®]-Hull を採用したばら積み船が既に6隻竣工し, 現在, さらに10隻以上が建造中・適用予定である. 今後, 特にNSafe[®]-Hull をタンカーなど幅広い船種に適用することで, 安全・確実な海上輸送への貢献が期待される.

文 献

- (1) 海上保安庁: 海難の現況と対策について, (2012).
- (2) G. Nataro, K. Brinchmann and E. Steen: Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by J. Amdahl, S. Ehlers and B. J. Leira, (CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013), 85-92.
- (3) M. Schöttelndreyer, I. Tautz, W. Fricke and E. Lehmann: Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by J. Amdahl, S. Ehlers and B. J. Leira, (CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013), 101-108.
- (4) S. Rudan, B. Aščić and I. Višić: Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by J. Amdahl, S. Ehlers and B. J. Leira, (CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013), 331-337.
- (5) 寺田好男, 児島明彦, 清瀬明人, 中島隆雄, 土井直己, 原卓也, 森本 裕, 杉山昌章: 新日鉄技報, 第380号, (2004), 76-81.
- (6) 辻 伸泰: 鉄と鋼, **88**(2002), 359-369.
- (7) 内山 郁, 角田方衛: 鉄と鋼, **57**(1971), 1897-1911.
- (8) 小指軍夫: 鉄と鋼, **61**(1975), 2998-3021.
- (9) 山田安平, 金湖富士夫: 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第17号, (2013), 175-178.
- (10) Y. Yamada, H. Endo, P. T. Pedersen: International Journal of Offshore and Polar Engineering, **18**(2008), 1-9.
- (11) A. J. Brown: Marine Structures, **15**(2002), 335-364.
- (12) B. Liu and C. G. Soares: 7th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by S-R. Cho, H. K. Shin, J. Choung and R-T Jung, (The Society of Naval Architectures of Korea, 2016), 157-164.
- (13) Y. Yamada, S. Tozawa, T. Arima, K. Ichikawa, N. Oda, K. Kamita and H. Suga: 7th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by S-R. Cho, H. K. Shin, J. Choung and R-T Jung, (The Society of Naval Architectures of Korea, 2016), 215-223.
- (14) 例えば, 日刊工業新聞, 2009年8月26日, 15.
- (15) 特許第5994819号(出願日: 2014年5月30日).
- (16) 特許第6007968号(出願日: 2014年12月26日).
- (17) 特許第3434444号(出願日: 1997年12月26日).
- (18) 特許第3434445号(出願日: 1997年12月26日).
- (19) 特許第3434446号(出願日: 1997年12月26日).
- (20) 特許第3499125号(出願日: 1998年3月3日).
- (21) 特許第3499126号(出願日: 1998年3月3日).
- (22) 特許第5893231号(出願日: 2015年5月26日).
- (23) 特許第5167917号(出願日: 2008年4月10日).
- (24) 特許第5167918号(出願日: 2008年4月10日).