

高強度・高延性鋼による 油タンカーの衝突安全性向上

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. 船舶の衝突事故とその対策

最近でも、依然として日本近海を含めて、世界中で船舶の衝突事故が発生している。例えば、2017年1月28日にはインドの Chennai 近くの Kamarajar 港沖で LPG タンカー MV Maple Galaxy が、石油タンカー MT Dawn Kanchipuram に衝突し⁽¹⁾⁽²⁾、大量の油を流出させた⁽³⁾。それにより営巣活動時期であった絶滅危惧種のオリーブヒメウミガメなどの生態系への影響が懸念されている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾、10万人と推定される漁業者中の多数が周辺地域から退避することが余儀なくされているといわれている⁽⁵⁾。このように、船舶の衝突や座礁による損傷は浸水や沈没などによって貴重な人命や資源を喪失させる可能性があることに加え、特にタンカーなどから油漏洩等が生じれば、深刻な海洋環境汚染に繋がり、その被害は甚大である。

そこで、万が一事故が発生した場合に備え、被害を軽減する構造的な対策が提案されている。具体的には1960年代以降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っている。特に41000トンの原油を流出したといわれる、1989年のエクソン・ヴァルデズ号の事故⁽⁶⁾を契機に、IMO(International Maritime Organization: 国際海事機関)は船舶の事故などによる海洋汚染を防止することを目的にした MARPOL 条約を1992年に採択し、船殻を二重化するダ

ブルハル化を義務づけた。このようなダブルハル化により、油漏洩の危険性は低減したものの、一部には船舶の衝突対策は、いまだ不十分との指摘もある。そこで、例えば高弾性高分子材料(「Core」)を含むサンドイッチ鋼板システム⁽⁷⁾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⁽⁸⁾、LPG(Liquefied Petroleum Gas)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⁽⁹⁾などが提案されている。

このような異種非金属材料の導入や構造変更ではなく、鋼材性能の向上により、船体重量や施工・検査の負荷を上昇させずに、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的合理性に適っている。具体的には、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ことができる。既報⁽¹⁰⁾でも示した通り、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(NMRI)、一般財団法人日本海事協会(ClassNK)と協力して、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た。その一環として、新日鐵住金は、特に船側構造向けに延性に優れた高強度鋼板である NSafe®-Hull を開発した。開発では、化学成分適正化と Thermo Mechanical Control Process 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。本鋼材は新日鐵住金、今治造船株式会社と海上・港湾・航空技術研究所との共同研究において、ばら積み運搬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、建造中や適用予定のものも含めて、10隻以上の実船適用があり、溶接性などの加工性も従来鋼と同等であることも実証されている。さらに石灰石運搬船やセメント運搬船などへの適用も進みつつあり、船舶の

* 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

Improvement of Crashworthiness of Oil Tankers with High Strength and Highly Ductile Steels; Kazutoshi Ichikawa*, Teppei 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)

2017年10月30日受理[doi:10.2320/materia.57.14]

安全性向上に寄与した上で、商業的にも成功している。

当然ながら、海洋環境保護への効果が最も期待できるのは、このNSafe®-Hullを油タンカー、特にVLCC (Very Large Crude oil Carrier)に適用した場合であるが、既報ではその効果を定量的に示していない。そこで、本論文では、本鋼の社会的理解を促進し、実船適用を推進すべく、NSafe®-HullをVLCCに適用した場合の効果を詳説し、高機能金属材料の提供を通じた国際社会の安全・安心への貢献への契機としたい。

2. 船舶の衝突安全性に寄与する NSafe®-Hull の特性と承認

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。表 1 に ClassNK 規則・検査要領における伸びの最小値を示したが、これに対し、高延性鋼として ClassNK の材料承認(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)を取得している(表 2)。ここで、記号「K」は船級協会名、すなわち ClassNK を示し、次の記号で衝撃試験温度を示す(A：0℃、D：-20℃)。次の数字で強度クラスを示し、「32」あるいは「36」は各々、降伏点または耐力が315 および355 N/mm² 以上である。高延性であることを示す「HD」の後の「35」あるいは「50」で従来規則(表 1)からの伸びの改善率を示し、各々1.35および1.50倍である。

3. VLCC における NSafe®-Hull の耐衝突特性解析

ここでは、まず、VLCC に NSafe®-Hull を適用した場合の被衝突時の吸収エネルギーに与える効果を船体構造に ClassNK の規則・検査要領相当の伸びを有する従来鋼と本

表 1 ClassNK 規則・検査要領における伸びの最小値.

材 料	厚さ <i>t</i> (mm)			
	10< <i>t</i> ≤15	15< <i>t</i> ≤20	20< <i>t</i> ≤25	25< <i>t</i> ≤30
軟鋼および YP32	17	18	19	20
YP36	16	17	18	19
YP40	15	16	17	18

表 2 造船用高延性鋼の ClassNK の材料承認.

強度区分	対従来鋼 伸び改善率	
	1.35倍	1.50倍
YP32キロ級鋼	KA32-HD35	KA32-HD50
	KD32-HD35	KD32-HD50
YP36キロ級鋼	KA36-HD35	KA36-HD50
	KD36-HD35	KD36-HD50

鋼を適用した2つの場合で比較した例で示す。停止したVLCCの船側部に対し、VLCC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。なお、既報と同様に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⁽¹¹⁾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、VLCCに本鋼を全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、被衝突船全体での吸収エネルギーは例えば、約1.4倍以上に向上することがわかった(図 1)。

次に、図 2 に、従来鋼を使用した場合、NSafe®-Hull を部分適用した場合および NSafe®-Hull を全適用した場合の被衝突船外板の破口限界曲線を示す。定量的指標である限界衝突速度⁽¹²⁾を比較すると、被衝突船の船長方向と衝突船の進行方向が最も厳しい90°の場合でも、適用部位最適化により、VLCC が12ノット90°衝突しても外・内板の破口は生じないが、従来鋼を使用した場合には、およそ3ノットの衝突速度で破口が生じると推定されるという計算結果が得られた⁽¹³⁾。図 3 には VLCC に従来鋼を使用した場合、NSafe®-Hull を部分適用した場合および全適用した場合の非線形有限要素法解析による荷油タンク内側から見た被衝突後の破口

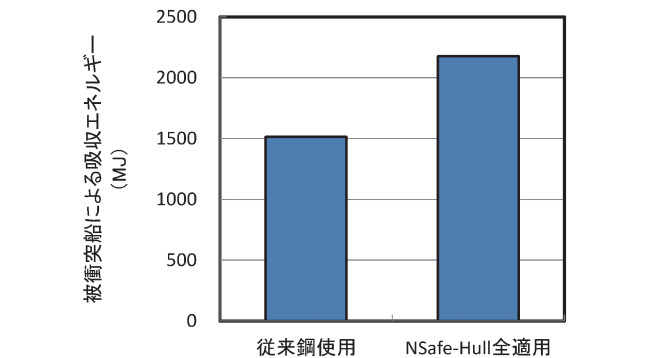


図 1 衝突時の被衝突船(VLCC)による吸収エネルギーの比較例。

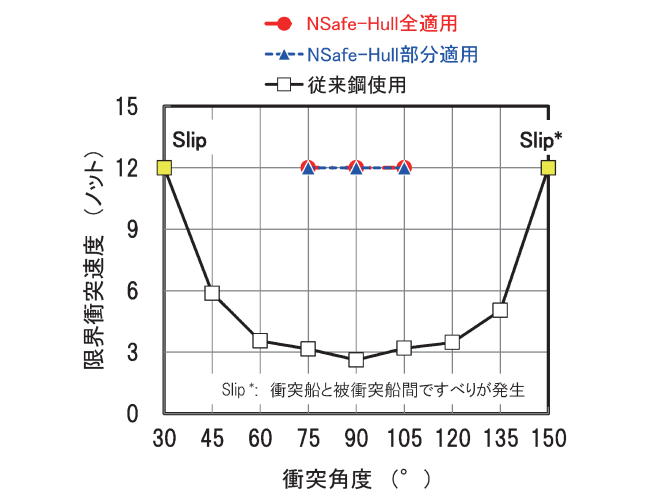


図 2 VLCC 外板の破口限界曲線。

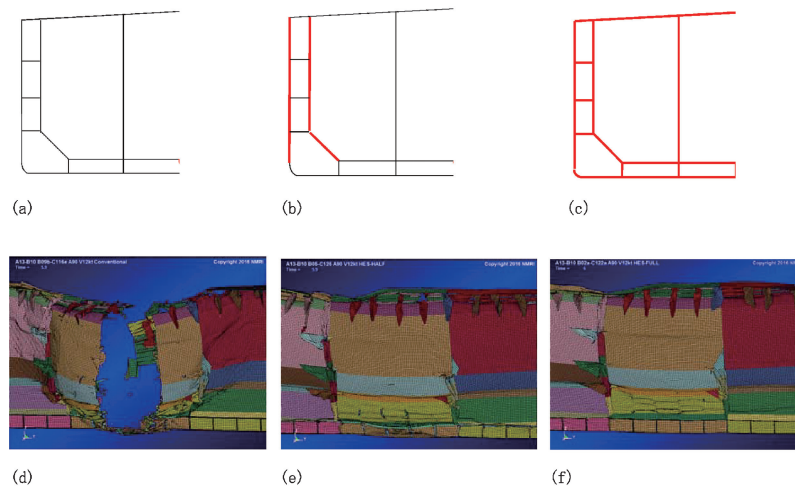


図3 12ノット衝突時の被衝突船(VLCC)の損傷状況の非線形有限要素法によるNSafe[®]-Hullの適用の効果の検証例(衝突後約6秒, 荷油タンク内側からの視野, 海上技術安全研究所提供)。(a) 船体構造に従来鋼を適用した場合の船側部垂直断面の模式図, (b) NSafe[®]-Hullを部分適用した場合の同模式図, (c) 同鋼を全適用した場合の同模式図, (d) (a)の場合の衝突解析結果, (e) (b)の場合の衝突解析結果, (f) (c)の場合の衝突解析結果, (b)と(c)において, 赤線部分がNSafe[®]-Hullの適用範囲。

の発生状況推定の例を示す。従来鋼の場合には大きな破口が生じているが, NSafe[®]-Hullを部分適用や全適用した場合にはそのような大きな破口は認められない。このようにNSafe[®]-HullをVLCCに適切に適用すれば, 万が一衝突を受けても, 油漏洩の危険性は極めて小さい。

なお, 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た。ClassNKでは, 上述の材料承認のほか, 船体構造の適用部位の指定(Descriptive Note)による高延性鋼使用した箇所を表記の制度(例: KA32-HD50 applied to side shell plate and side longitudinal within No. Y-Z WBT)やClassNK Notationとして衝突や座礁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に“Hull Protection by Highly Ductile Steel”(HP-HDS)を付記する船舶の認証の制度を制定している。

4. 結 言

VLCCの船体構造に高延性鋼NSafe[®]-Hullを適切に配置することにより, 衝突時の船体破口の低減が可能である。

これらの技術は例えば参考文献(14)–(23)に列举したように, 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一環として特許登録査定されている。

この鋼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し, 万が一船舶の衝突事故が発生した場合においても, 油漏洩に伴う海洋環境汚染に伴う生態系への影響などを最小限に抑制することが可能である。

文 献

- (1) The Pioneer, New Delhi, India, 7th February, (2017).
- (2) The Times of India (Online), New Delhi, India, 3rd February, (2017).
- (3) The Hindustan Times, New Delhi, India, 2nd February, (2017).
- (4) The Times of India (Online), New Delhi, India, 1st February, (2017).
- (5) New York Times Company, 3rd February, (2017).
- (6) 大内健二: 海難の世界史, 成山堂書店(2002), 168–175.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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, **56**(2017), 30–32.
- (11) 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.
- (12) Y. Yamada, H. Endo and P. T. Pedersen: International Journal of Offshore and Polar Engineering, **18**(2008), 1–9.
- (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) 特許第5994819号 (出願日: 2014年5月30日)。
- (15) 特許第6007968号 (出願日: 2014年12月26日)。
- (16) 特許第3434444号 (出願日: 1997年12月26日)。
- (17) 特許第3434445号 (出願日: 1997年12月26日)。
- (18) 特許第3434446号 (出願日: 1997年12月26日)。
- (19) 特許第3499125号 (出願日: 1998年3月3日)。
- (20) 特許第3499126号 (出願日: 1998年3月3日)。
- (21) 特許第5893231号 (出願日: 2015年5月26日)。
- (22) 特許第5167917号 (出願日: 2008年4月10日)。
- (23) 特許第5167918号 (出願日: 2008年4月10日)。