

# 衝突時の安全性を高めた 船舶用高強度高延性鋼板の開発

中島孝一<sup>\*1)</sup> 一宮克行<sup>\*1)</sup> 長谷和邦<sup>\*2)</sup>  
衛藤太紀<sup>\*3)</sup> 深井英明<sup>\*3)</sup>

## 1. 緒 言

液化石油ガス(LPG)や液化天然ガス(LNG)などのガス搭載船や原油タンカー等の船舶では、座礁や衝突によるガス・油の流出が環境汚染の観点から問題となっており、船殻の二重構造化等の船体構造面からの取り組みがなされている。一方で、変形性能を向上させた鋼板を適用することによっても衝突時の安全性を向上することが可能であり、変形性能と鋼板のミクロ組織の相関に関する検討も実施されている。延性に優れた軟質なフェライトを母相とし、ベイナイトやマルテンサイトといった硬質相を第二相とした複相組織とすることで鋼板の変形性能を向上できることが示されている<sup>(1)-(5)</sup>。

高変形能の複合組織は、二相域焼入れ-焼戻しの熱処理プロセスにより形成することが可能であり、自動車用薄鋼板や調質型厚鋼板で実績があるが、本開発では、船舶用鋼板として、工業的な生産性の点から、制御圧延-加速冷却を適用したオンラインプロセスでの検討を志向した。また、薄鋼板分野では、更に強度延性バランスを追求し、第二相をサブミクロンオーダーで微細分散させた組織制御の検討もなされている<sup>(6)</sup>。しかし、厚鋼板分野では、溶接部特性等の観点から主強化因子として析出強化を用いる材質設計を適用することは非常に困難であり、溶接部特性に配慮した上での変形性能アップが必要である。

以上の課題を踏まえて、著者らは、鋼材の化学成分を大幅に変更することなく、溶接部特性は従来の材料と同等に確保しつつ、厚板圧延時のオンラインプロセスにおける最適化技術を駆使することで、母材の高延性化を図り、衝突時の安全

性を向上した船体用高強度鋼板を開発した。本稿では、開発鋼の特徴ならびに性能について紹介する。

## 2. 開発技術

図1に開発鋼のコンセプトを示す。鋼材から採取した引張試験片に荷重を付与すると図のような公称応力-公称歪曲線が得られる。この試験片になされた仕事すなわち変形時の吸収エネルギーはハッチング部の面積に等しくなるため、鋼材自体の延性を向上することができれば吸収エネルギーを増大させ、構造体が衝突した際の安全性を向上できると考えられる。また、本開発では、船体の側面部に使用される鋼板として、降伏応力(YP)が315 MPa, 355 MPa級の高強度鋼板を対象とし、従来材で形成するフェライト-パーライト組織に対して第2相のベイナイト化を図った。フェライト-パーライトおよびフェライト-ベイナイト組織を有する供試材を実験室レベルで作製し、引張強さと延性の関係が整理した結果を図2に示す。従来知見と同様に、本対象の成分系においてもフェライト-ベイナイト組織を有する材料で優れた強度・伸びバランスが得られている。以上のラボ検討結果をもとに、フェライト-ベイナイト組織を得るために、実製造ライ

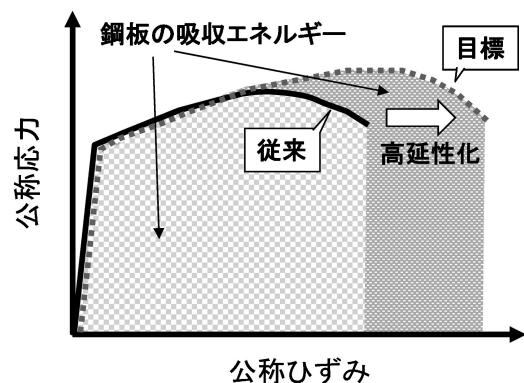


図1 開発鋼のコンセプト。

\* JFE スチール株式会社  
スチール研究所 鋼材研究部; 1)主任研究員 2)部長  
3)西日本製鉄所 鋼材商品技術部 主任部員  
Development of High Strength Steel Plate with Superior Deformability for Ship Safety in Collision; Koichi Nakashima, Katsuyuki Ichimiya, Kazukuni Hase, Taiki Eto and Hideaki Fukai (JFE Steel Corporation)  
2015年11月5日受理[doi:10.2320/materia.55.111]

ンにて高度なオンライン製造プロセスを適用し鋼板を製造した。図3に、オンライン製造プロセスの概念図を示す。通常プロセスでは、例えば(a)のように、スラブ加熱後の、制御

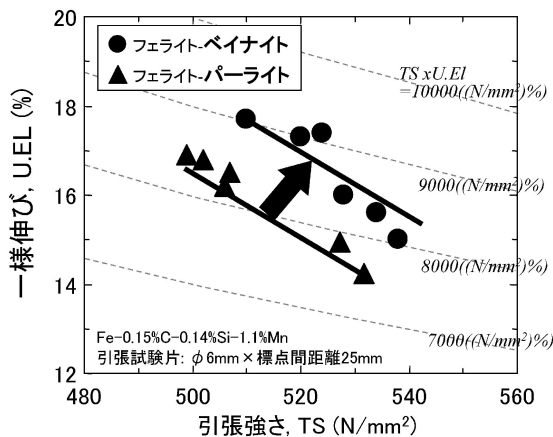


図2 フェライト-ベイナイト，フェライト-パーライト組織材における引張強さと延性の関係。

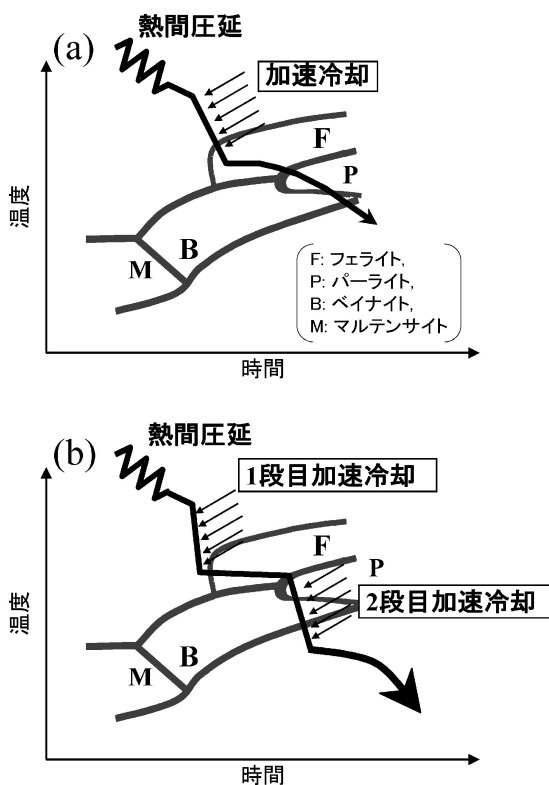


図3 オンライン製造プロセスの概念図。

圧延や加速冷却の条件を最適化することで所望の強度調整が図られる。一方で、(b)のように、2段の冷却プロセスを適用することにより、変形性能に優れた軟質なフェライトを多量に分散しつつ、第2相のベイナイト化を促進することが可能となる。1段目の冷却ではフェライトノーズ付近の温度域で冷却を停止、保持することでフェライト変態を進行させ、2段目の冷却では未変態の残留オーステナイトのベイナイト化を図る。このとき、2段目の冷却は通常プロセスに対して冷却停止温度を低くすることによりベイナイト相を形成させている。図4に開発鋼のマイクロ組織例を示す。軟質なフェライトが多量に分散しており、第2相としてベイナイト相が形成しており目的の組織が得られている。

### 3. 開発鋼の特性

#### (1) 母材の引張特性

上述の組織制御の考え方にに基づき、実機製造ラインにて板厚 17 mm の高強度鋼板を製造した。開発鋼の化学成分を表1に示す。化学成分は KA32, KD32, KA36, KD36 の規格範囲(NK 船級)であり従来材と同等である。また、日本鋼船工作法精度標準(JSQS: Japan Shipbuilding Quality Standard)では、C当量が0.36 mass%を超えるTMCP型高張力鋼について、溶接時の予熱実施等の制約を規定している。開発鋼はJSQSにおける本条件も十分に満足しており、優れた溶接性を有し予熱フリー溶接が可能である。図5に開発鋼の応力-歪線図の例を示す。比較のため従来材の全伸びおよび引張強さで規格化している。開発鋼は、従来材と同等の高強度を有しつつ、優れた延性を示している。全伸びは従来材に対して大幅に向上しており、変形時の吸収エネルギーの向上に有効に作用すると考えられる。

#### (3) 衝突解析結果

船体が衝突した際の損傷状況を船舶衝突シミュレーション

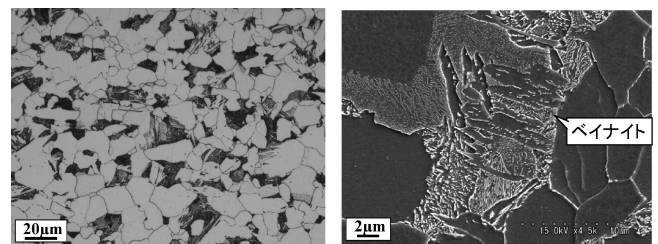


図4 開発鋼のマイクロ組織例。

表1 開発鋼の化学成分。

板厚 (mm)	化学成分 (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Others	Ceq*	
	0.14	0.27	1.09	0.013	0.006		0.32	
KA32, KD32 KA36, KD36	17	≤0.18	≤0.50	0.90-1.60	≤0.035	≤0.035	Nb, Ti	≤0.36 (KA32, KD32) ≤0.38 (KA36, KD36)

\* Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15

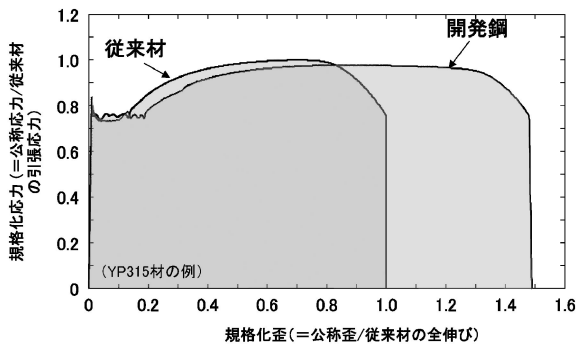


図5 開発鋼の応力-歪曲線例.

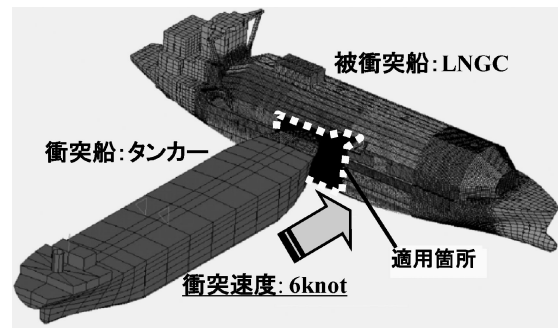


図6 衝突解析モデルの概略図.

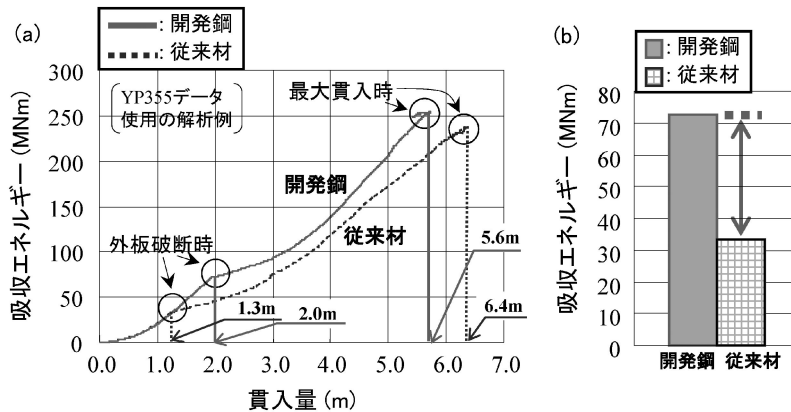


図7 衝突解析の結果 (a) 吸収エネルギーと貫入量の関係、  
(b) 外板破断時の吸収エネルギーの比較.

により解析した<sup>(7)</sup>。衝突解析モデルの概略図を図6に示す。LNG船の側面部に、高延性の開発鋼および従来材を配置し、タンカーが衝突した場合に、被衝突船が吸収するエネルギーおよび衝突船の貫入量を評価した。なお、本解析では、引張特性の歪速度依存性データも取り込み、衝突時の被衝突船まわりの歪速度分布も考慮されている。解析結果を図7に示す。高延性の鋼板を適用することにより、最大貫入量が約10%低減(a)、船体に吸収されるエネルギー(外板破断時)が約2.2倍向上し(b)、船体衝突時の安全性を高めることが可能である。本結果は高延性鋼を船体の側面にのみ適用したケースを想定したものであり、その他の部位(ロンジ等の補強材)に用いれば更なる効果が期待される。

#### 4. 実用化状況および特許

船舶衝突時の安全性を高めることができる高強度、高延性の衝突安全鋼を開発した。本衝突安全鋼は、世界で初めてLPG(液化プロパンガス)運搬船に実船適用され、今後ますます

当該分野の鋼材として適用が拡大していくと考えられる。また、本技術に関連した特許も取得済み<sup>(8)</sup>である。なお、開発に際して、三菱重工船舶海洋株式会社殿に船舶衝突に関する解析を実施頂いた。ここに感謝の意を表します。

#### 文 献

- (1) J. H. Bucher and E. G. Hamburg: Formable HSLA and Dual-Phase Steels, ed. by A. T. Davenport, (1979), 142-150.
- (2) 古川 敬: 日本金属学会会報, **19**(1980), 439-446.
- (3) 高橋政司, 国重和俊, 岡本篤樹: 日本金属学会会報, **19**(1980), 10-16.
- (4) 国重和俊: 材料, **50**(2001), 47-54.
- (5) S. Oliver S, T. B. Jones and G. Fourlaris G.: Mater. Sci. Technol., **23**(2007), 423-431.
- (6) 船川義正, 藤田 毅, 山田克美: JFE 技報, (2012), 1-5.
- (7) K. Hirota, S. Nakayama, T. Okafuji, K. Nakashima, K. Hase, H. Shiomi and S. Tsuyama: Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, Greece, (2012), 763-768.
- (8) 例えば, 特許第3578126号.