

信頼性を高めた新型貨物タンク採用の次世代 LPG 船 - IMO タイプBタンクの適用 -

New LPG Carrier Adopting High Reliable Cargo Tank
- IMO Tank Type B -



田村 浩*¹
Hiroshi Tamura

大塚 浩友*²
Hirotomo Otsuka

石田 聡成*¹
Toshinori Ishida

宮崎 智*³
Satoshi Miyazaki

LPG は新興国での消費拡大、天然ガス及びシェールガス随伴としての供給量の増加に伴い、海上輸送量の増加及びトレードの多様化が進んでいくものと考えられる。当社は、時代のニーズに合った LPG 船の開発を継続しており、2006 年以降はカーゴタンク容積増加のトレンドに対応し 83000m³型を主力として建造を行ってきた。今回、経済性と環境性能の向上を目的としたバージョンアップを実施するに当たり、信頼性の向上とメンテナンス費の低減というお客様のメリットを実現するカーゴタンクを新規に開発した。既に複数の船級協会から承認を得ており、米国沿岸警備隊 (USCG) から承認を取得している。このタンクは 2012 年引渡しの LPG 船に適用済みであり、今後も積極的に受注活動を展開するとともに、お客様のニーズに応えられるよう開発を継続していく。

1. はじめに

当社は 1962 年以降、半世紀にわたり LPG 船の建造を行ってきた。1989 年の日雄丸以降 78000m³型をデファクトスタンダード化し、2006 年からは 83000m³型もラインナップアップに加え、様々なお客様向けに建造してきた。今回、昨今の環境規制強化への対応や性能競争力の更なる強化を目的に船型・構造・配置の一新を行ったが、この機会により一層のお客様メリットの付加を目指し、カーゴタンクに IMO タンクタイプ B 方式を採用した。

本論では本船で採用した構造について従来船との違い、運航上のメリット等について述べる。

2. LPG 船のタンク方式について

LPG 船では、船体から独立したカーゴタンクがホールド内に配置され、支持台等で支えられている。表1に LPG 船で採用されているタンク方式の比較を示す。20000m³以下の中小型船ではタイプ C の円筒型又はその組み合わせによるタンクが採用され、常温又は冷却圧縮状態で LPG を運搬するケースが多い。一方、タンク容積が大きくなると、このタイプでは板厚が非常に厚くなるため、大型船では独立方形タンクが採用され低温常圧状態で運搬される。独立方形タンクで通常採用されるタイプ A の場合、タンクは古典的な船体構造の設計基準で設計される。そのため、タンクの大規模破壊による大量漏洩を想定し、タンクの周囲には貨物全量を保持することができる格納構造(二次防壁)が要求され、ホールド全体が二次防壁として機能するような設計が行われる。他社建造船も含め、現在運航されている大型 LPG 船のカーゴタンクは全てこのタイプ A 方式である。一方、タイプ B タンクでは多重安全性の考えに立った設計が行われ、厳密な解析により十分な疲労強度を有すること、疲労欠陥が発生したとしても設計寿命内に貫通に至らないこと、さらに万一貫通し漏洩が検知されたとしても定められた期間内の漏洩量は限定的であることが証明されて

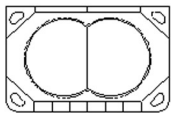
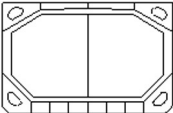
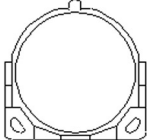
*1 船舶・海洋事業本部長崎船海技術部 主席技師
*3 船舶・海洋事業本部長崎船海技術部

*2 船舶・海洋事業本部長崎船海技術部 課長

いる。そのため想定される限定的な最大漏洩量を保持するだけの部分的な二次防壁の装備で許容される。タイプB方式の代表例としてはMOSSタイプLNG船があり、部分二次防壁としてドリップトレイが設けられている。

当社は大型LPG船とMOSSタイプLNG船の両方を長期にわたって建造しており、独立方形タンク(タイプA)の設計・建造技術とMOSSタイプLNG船(タイプB)で培った設計ノウハウや解析技術を保持している。今回それら技術を結集することによりタイプB方式の独立方形タンクの開発が実現した。

表1 タンク型式比較

タンク型式	独立円筒型	独立方形		(参考) MOSSタイプ (独立球形)
	圧力式 又は 低温圧力式	低温式		低温式
構造				
IMO タンクタイプ	タイプC	タイプA	タイプB	タイプB
二次防壁	要求なし	完全二次防壁	部分二次防壁	部分二次防壁
備考	20000m ³ 以下の 小型船に向く	大型船に向く		LNG船で使用される

3. タンクタイプB方式 LPG 船の開発

3.1 開発船型の特徴

開発船型の主要目を表2に、配置図を図1に示す。

表2 83000m³型 LPG 船 主要目比較

	従来 83000m ³ 型	新 83000m ³ 型
全長×幅×深さ	219.0m × 36.6m × 21.65m	219.0m × 36.6m × 21.65m
吃水(計画/満載)	11.15m/11.60m	11.10m/11.55m
貨物容積	83000m ³	83000m ³
タンクタイプ	独立方形タイプA	独立方形タイプB
二次防壁	完全二次防壁	部分二次防壁
防熱	ポリウレタンフォーム	ポリウレタンフォーム
船速	17.0kt	17.0kt
主機馬力	MR : 13700kW	MR : 13000kW
	NR : 12330kW	NR : 11700kW

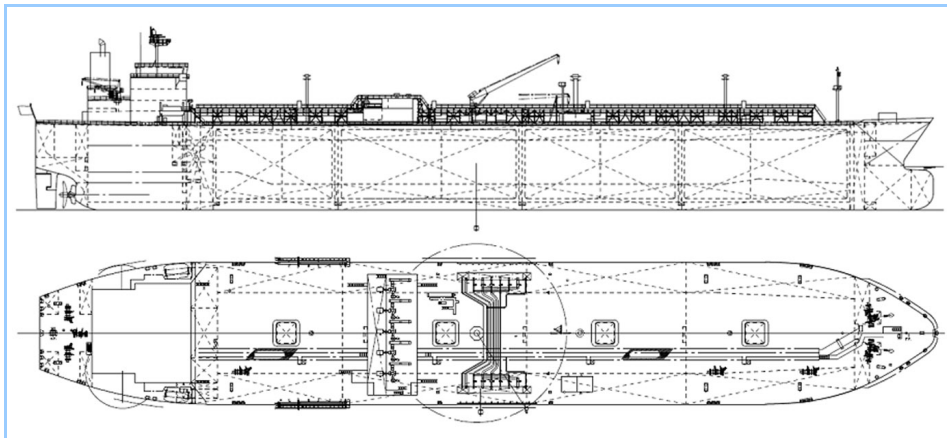


図1 新 83000m³型 LPGC 概略配置図

ターミナルへの適合性を考慮し、主寸法、主要配置は当社の前シリーズ船から変更していない。前シリーズ船からの主な改善点を以下に示す。

- ・ 性能改善: CFD/模型試験結果に基づいた船型改良により推進性能を5%改善
- ・ 配置改善: 燃料タンクをカーゴホールドとエンジンルーム間に集中配置することでダブルハルに伴う狭隘区画を減らし、シンプルな構造を実現するとともに、エンジンルーム内下部前方にバラスト水処理装置設置スペースを設けている。
- ・ 信頼性向上: カーゴタンクとしてタイプBを採用。

本章では以下タイプB方式について説明する。

3.2 タイプB方式カーゴタンクの構造設計

板骨構造を採用する方形タンクでは、球形タンクと比較して、タンク全体の溶接線が非常に長いこと、タンク内の構造が複雑であり多数の構造不連続部が存在すること、さらに独立方形タンクは熱収縮を考慮してタンク支持台に溶接固着しない構造となっているため、タンク・船体の相互影響を考慮した波浪中の挙動を正確に把握する必要があること等、高い安全性が要求される液化ガスタンクに対して信頼性を検証・証明することは技術的に難易度が高く、重要な課題である。

IMO タンクタイプB方式は国際海事機関(IMO)が定めた液化ガス船の安全規則(IGC コード)の要件を満たすタンクである。高度な解析手法を用いて構造各部の応力を精密に把握し、これに基づく疲労解析、破壊機構解析による検証を実施したタンク方式であり、疲労き裂の発生寿命評価に加え、万一き裂が発生、進展した場合の挙動予測に基づく安全性評価が要求されている。この高度な要件に対し、当社では、自社開発した荷重構造一貫解析システムである「直接荷重解析法(Direct Loading Analysis Method, MHI-DILAM)」を用いて、信頼性の高いタンクの構造設計を実現している。タンクタイプB方式の設計フローを図2に示す。

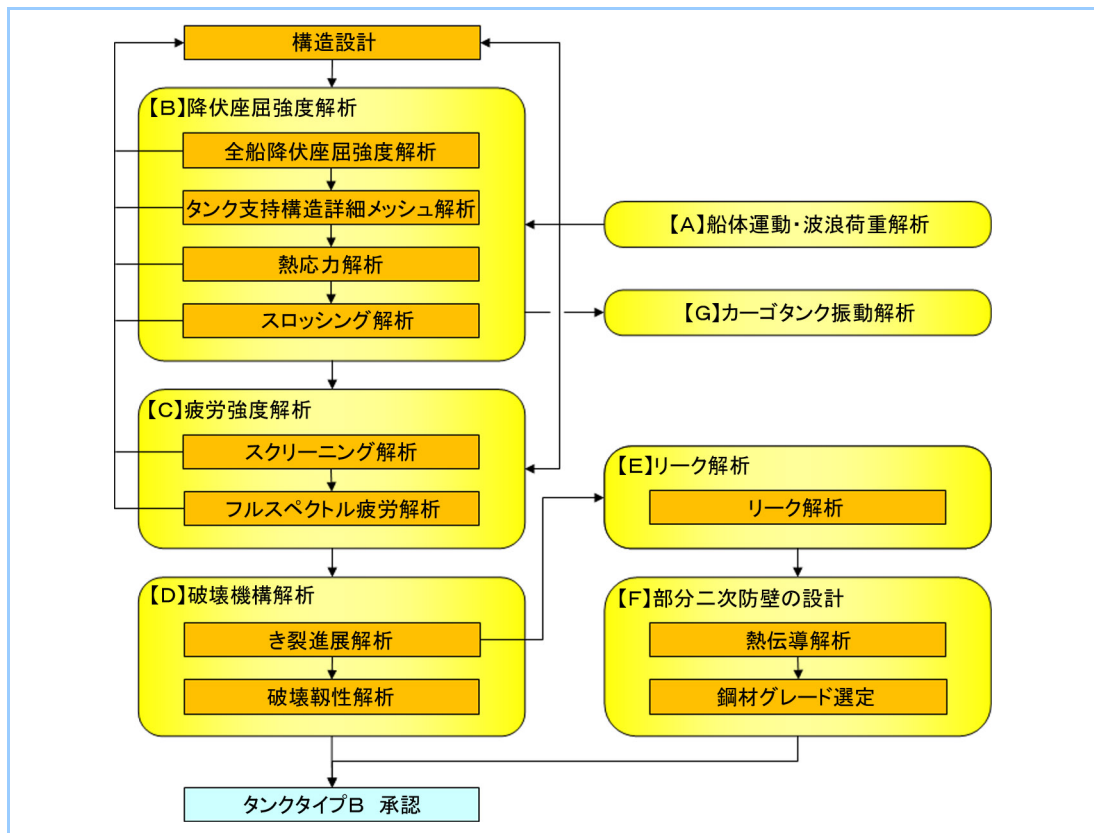


図2 タンクタイプBの設計フロー

まず、荷重構造一貫解析に不可欠となる船体運動・波浪荷重解析に続いて、降伏座屈強度解析を実施する。ここでは、世界で最も厳しい海象条件とされる北大西洋において約 25 年に一度だけ発生するような極限状態の荷重を MHI-DILAM を用いて生成し、有限要素解析法(FEM)に

より構造応答を評価する(図3)。MHI-DILAM の方形タンクへの適用に当たって特筆すべき点として、タンク支持構造(樹脂製断熱ブロックを船体とタンクの間挟み支持するシート構造)の複雑な挙動を適切に評価できることが挙げられる。独立方形タンクの構造設計においては、断熱ブロックの接触・非接触現象により変化する支持反力及び断熱材の摩擦力などの非線形影響を考慮して、タンク・船体の複雑な相互影響を把握することが必須である。MHI-DILAM は、非線形 FEM 解析を適用することにより、これらの挙動を忠実にシミュレートして合理的かつ信頼性の高い構造設計を可能としている。

次に疲労強度解析においては、MHI-DILAM を用いて大規模全船 FEM モデルを用いた“スクリーニング解析”と局部詳細 FEM モデルを用いた“ホットスポット解析”の二段階の疲労強度評価を実施している。この評価手法により方形タンクの多数の構造的不連続部を漏れなく検証し、その中からクリティカルな箇所を正確に特定し、スペクトル解析による精密な疲労発生寿命評価を実施することが可能となる(図4)。

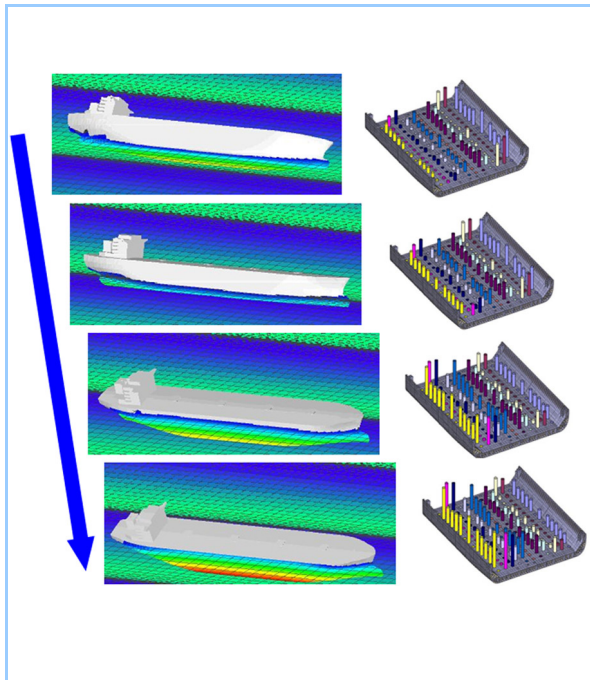


図3 極限荷重状態での船体運動及び構造応答シミュレーション

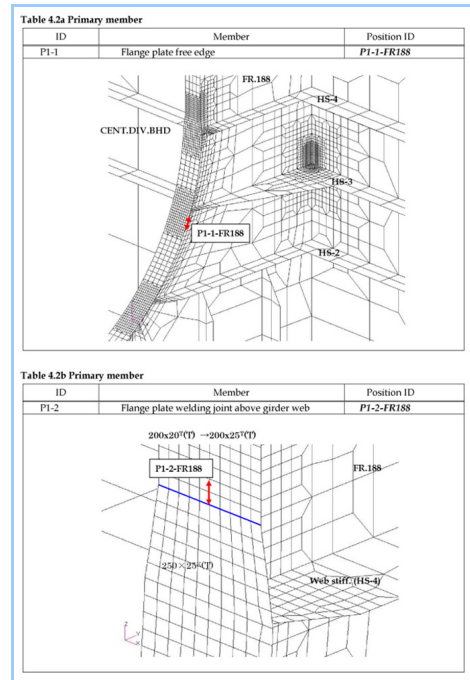


図4 ホットスポット解析の一例

続いて破壊機構解析では、疲労強度解析で用いた応力解析結果をもとに、疲労き裂先端の応力場を直接計算し、き裂進展経路と速度の予測の数値シミュレーションを実施している(図5)。さらにき裂近傍の応力変動を基に微小き裂からの漏洩量を推定し、LPG 漏洩時の検知可能性と、漏洩したLPGをIGCコードが要求する15日間以上、安全に格納処理できることを確認している。これらの解析により、カーゴタンク内のすべての箇所において IGC コードの要求を満足する信頼性の高いタンクを設計することができる。

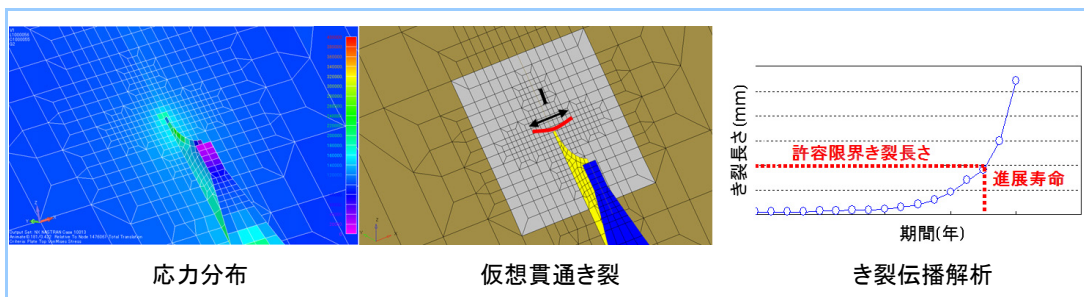


図5 き裂伝播シミュレーション

今回開発したLPG船では豊富な実績を有するタンク構造をベースに、疲労強度解析などの結果に基づき、更なる詳細構造の改善も行っている。例を挙げると、大骨端部のソフト化やタンク支持構造ブラケットの形状改善、ロンジ端部の応力集中低減などきめ細やかな詳細設計の改善を織り込んでいる。

また前述のスクリーニング/ホットスポット解析による広範囲かつ詳細な信頼性評価に基づき、構造部材の損傷リスクを定量的に評価して、重点的に保守点検をすべき箇所を示したガイドラインを提供している。重点点検箇所については点検用プラットフォームの設置など作業性にも配慮を行い効率的な保守点検を可能としている。

3.3 二次防壁

タイプB方式では、従来のタイプA方式のようにホールド全域を二次防壁とする完全二次防壁は必要なく、想定される貨物漏洩量に対して十分な容量を保持するだけの部分二次防壁とすることができる。今回はホールド底板全域及び、横／縦傾斜時を考慮して漏洩貨物が接触する前後隔壁及びサイド傾斜部の下部までを二次防壁とした。二次防壁の範囲の設定に際してはIGCコードに従い、入熱による液蒸発処理を考慮して定量評価を行っている。具体的には、入熱による液蒸発処理量と液の格納可能量(15日間)を定量的に評価し、許容リークレートを求めた上で、破壊機構解析により求まる設計リークレートとの比を安全率とし、適正な安全率が確保されていることを確認している。なお、最前部や最後部のようにホールド底面形状が台形となるような場合には、横傾斜時、漏洩貨物がホールドコーナーに局所的に集まることも考慮して設定されている。IGCコードの規定に従い二次防壁部の材料は低温用鋼としているが、従来の完全二次防壁に比べて低温用鋼の適用範囲が大きく低減されている。今回採用した部分二次防壁の概略図を図6に示す。

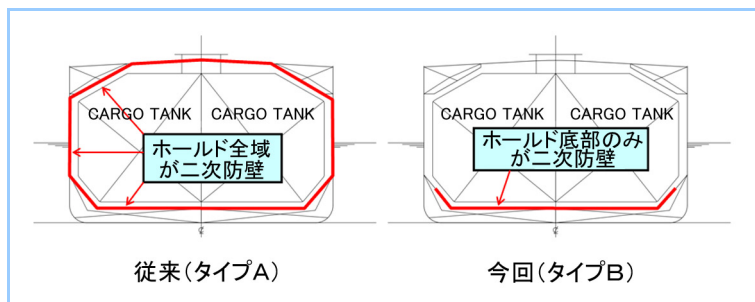


図6 二次防壁の比較

3.4 タンク防熱

タイプB方式の防熱システムとして、従来のタイプA方式のLPG船に採用している現場発泡方式を部分的に変更したものを採用した。タイプB方式の貨物格納設備では、部分二次防壁の範囲外の船体構造が低温に晒されることが無いよう、漏洩貨物の飛散を防止し(スプレーシールド)、二次防壁範囲内に導く設備が要求される。現場発泡方式では、防熱材の自己接着機能によりタンク表面に防熱材が固着するため、タンクに貫通き裂が生じた際に、漏洩貨物を二次防壁へ導く手段が必要となる。そこで、リークパスと称する漏洩貨物の流路を防熱材のタンク表面側に設置した。船級協会立会いの下、リークパスの性能試験、スプレーシールドの確認試験を実施し、所定のリークレートを満足すること及びスプレーシールド機能を有することを実証した。

3.5 船級承認

本タンク方式については、概念設計段階(2009年)で米国船級協会(ABS)/英ロイド船級協会(LR)/日本海事協会(NK)の3機関からApproval in principle(概念設計承認)を取得し、その後、実際の基本設計を実施、2010年には同3機関よりGeneral Approval(基本設計承認)を取得している。また、2012年には米国沿岸警備隊(USCG)からもConcept approvalを取得している。

4. タイプB方式 LPG 船によるメリット

貨物タンクをタイプBとすることにより、主として以下のメリットがある。

- (1) カーゴタンクの信頼性が高い: 詳細解析により安全性が確認されており、疲労等によって損傷するリスクが極めて低い。
- (2) 保守管理が容易: 重点的に点検をすべき箇所を示したガイドラインにより、就航後の保守管理を効率的かつ安定的に実施可能となり、船の生涯にわたって構造信頼性の維持が可能である。
- (3) カーゴホールドメンテナンス費用の低減: 従来はカーゴホールド全面を低温用鋼としていたが、タイプB方式では部分二次防壁となる底部を除き普通鋼となるため、岸壁フェンダーやタグボートとの接触等による万一の場合の船側損傷やトップサイドタンクの腐食等の補修が容易となる。

特に今後は従来の中東・アジア間を往復するというトレードパターンから、新興国の需要増大及び天然ガス田やシェールガスの随伴ガスとして生産地も拡大することに伴い、輸送ルートが多様化すると考えられるため、タンクの信頼性が高いこと、メンテナンスが容易であることは、修繕ヤードの選択や材料手配を考えた際に大きなメリットであると言える。

また、タイプBの場合はその他の装備次第でホールド内を通常のイナートガスに代えて乾燥空気とすることも認められており、航海中の点検が容易になる他、CO₂ 排出量の低減、イナートガス生成に要する燃料代を低減するということも可能である。

5. まとめ

半世紀にわたる LPG 船建造で蓄積した独立方形タンクのノウハウと MOSS タイプ LNG 船の建造を通じて得たタイプB方式タンクの設計/解析技術を結集して、タイプB方式の LPG 船を開発した。本方式は今後の多様化するトレードの中で、安全性と経済性というお客様のニーズに応えるものと確信している。本タンク方式は既に 2012 年引渡しの LPG 船に適用済みであり、現在受注活動を展開中である。今後も高品質の LPG 船を供給し続けると同時に、環境対策や使い勝手面等、お客様のニーズに応えるよう開発を継続していく予定である。

参考文献

- (1) 佐藤宏一ほか, 最先端構造解析プログラム MHI-DILAM—大型船舶・海洋構造物への適用—, 三菱重工技報, Vol.47 No.3 (2010) p.92~98