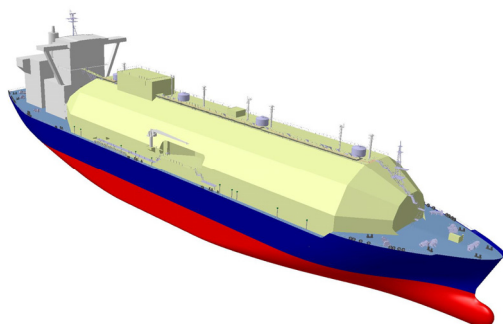


連続カバー構造を採用した大型球形タンク方式 LNG 船 一次世代軽量・コンパクト船“さやえんどう”

SAYAENDO

- New Generation LNGC with Continuous Integrated Tank Cover -



平松 彩*¹
Sai Hiramatsu

佐藤 宏一*²
Koichi Sato

塚本 泰史*³
Hirofumi Tsukamoto

球形タンク方式 LNG 船は、タンク構造の信頼性の高さや、耐スロッシング性などから北海、北極海周辺の環境条件の厳しい海域に適したタンク方式として評価されている。本論文では、球形タンク方式の長所を生かし、さらに進化させた LNG 船として連続タンクカバーと船体の一体化構造である“さやえんどう”船型を提案する。“さやえんどう”は構造解析技術をはじめとした当社の有する最新のシミュレーション技術により開発された船型であり、球形タンク方式 LNG 船の元来の長所である信頼性に加え、タンク容積の大型化や寒冷地対策に有利であることが、種々の技術評価により確認された。

1. はじめに

近年、北海周辺の寒冷地、氷海領域のガス田開発が計画されており、この領域からの輸送手段として球形タンク方式 LNG 船が注目されている。球形 LNG タンクは形状がシンプルであることにより信頼性が高く、北大西洋や氷海領域などの厳しい海象条件に適したタンク方式として評価されている。球形タンク方式 LNG 船は、直径 40m を越えるタンクを船体に搭載するというその特徴上、船体甲板上にタンクを突出させ、カバーで覆う構造が採用されており、タンクカバーの設計は配置、性能、構造設計上重要である。当社では、構造信頼性上優れた円筒と半球の組合せによるタンクカバーを開発、西豪州プロジェクト向け LNG 船をはじめとした豊富な就航実績を有している⁽¹⁾。

一方で、主船体の寸法に制約がある中で、タンク容積の大型化に対応するに当たって、船体構造重量のより有効的な利用法として、タンクカバーと船体を一体化するアイデアを評価した(図1)。

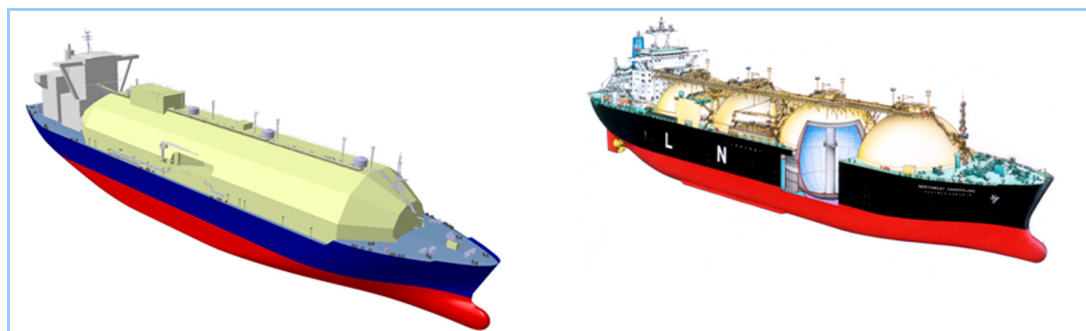


図1 連続タンクカバーと従来型カバーの比較

*1 船舶・海洋事業本部船舶・海洋技術部主席技師

*2 船舶・海洋事業本部船舶・海洋技術部課長 工博

*3 船舶・海洋事業本部船舶・海洋技術部

この“連続タンクカバー”による船体/カバー一体化構造は、連続したカバー(さや)の中に、球(まめ)が入っている外観から、“さやえんどう”とニックネームが付けられ、次章以降に紹介する技術開発の結果、特に、大型 LNG 船、寒冷地向け LNG 船、氷海地向け LNG 船において、従来設計にはない長所を有することが確認された。以下、具体的に紹介する。

2. “さやえんどう”の特徴

2.1 開発コンセプト“さやえんどうのメリット”

(1) 軽量, コンパクト

“さやえんどう”は、連続したカーゴタンクカバーで球形カーゴタンクを覆っており、構造が連続していることからタンクカバー自体を主船体の強度部材として活用でき、その結果、主寸法のコンパクト化及び船体鋼材重量の約 10% 軽減、排水量減による燃費の改善、ターミナルへの適合性向上等を図ることができる。165000^{m³} 型(以降 165km³ 型)に適用した場合の主寸法比較を(表1)に示す。

表1 連続タンクカバーLNG 船の主要目

	さやえんどう	従来型 球形タンクカバー船(参考)
貨物容積 (m ³)	165000	
全長 (m)	290	295
垂線間長 (m)	277	282
型幅 (m)	50.4	50.8
型深さ (m)	23.0	27.5
型喫水 (m)	11.5	11.5

(2) ターミナル適合性の向上

球形タンク方式 LNG 船を大型化する場合、従来型タンクカバー船では、必要な構造強度を確保するために船舶の深さを大きくする必要があり、ターミナルから接続されるギャングウェーやローディングアームとの適合性が厳しくなっていくという課題がある。“さやえんどう”は、連続タンクカバーが強度部材として構造強度に寄与しているため、深さを大きく削減できる。今回、国内外の主要ターミナルにおけるギャングウェー及びローディングアームが接続される高さを検討し、ギャングウェー用追加プラットフォームやカーゴマニフォールドをあらかじめ最適な高さに配置しておくことで、ターミナルとの適合性を大幅に改善した。図2に世界各国の主要ターミナルにおけるギャングウェー及びマニフォールド高さの適合率の比較を示す(当社所有データに基づく)。165km³型で比較した場合、従来型タンクカバー船の適合率が約8割であるのに対し、“さやえんどう”はほぼ100%のターミナルに適合できている。

(3) フライングパッセージサポート構造の改善

従来型タンクカバー船は、タンクカバー上方に貨物、ガス配管及び電線を通すための構造(通称フライングパッセージ)を有している。フライングパッセージはそのサポート構造が複雑で高所にあることからメンテナンス性が課題となっていたが、“さやえんどう”では、配管類や電線を連続タンクカバー上に配置でき、サポート構造を不要とできるためメンテナンス性が向上している。

2.2 プロトタイプ船の開発

先に説明した開発コンセプトに基づき、表1の主要目に示す 165km³ 型プロトタイプ船を開発した。まず、船型開発については、“さやえんどう”の特徴(軽量・コンパクト)を生かした船型・ラインズを検討し、水槽試験を実施して推進性能を確認した。さらに、船殻構造の主要基本図を作成し、カーゴホールド区画の総合配置図、前後部甲板上の係船機器の配置図作成まで完了した。配置設計に関しては3D-CAD である CATIA を活用し、従来と異なる配置の部分について入念に検討を行った。CATIA による検討図の一例を図3に示す。3D-CAD による検討により、タンクカバー上、船体甲板上及びホールド内部の配置や交通性が成立していることを確認した。

さらに船体のバラストタンク配置，船殻大骨配置には，“さやえんどう”の特性を生かした最適化を行っている。

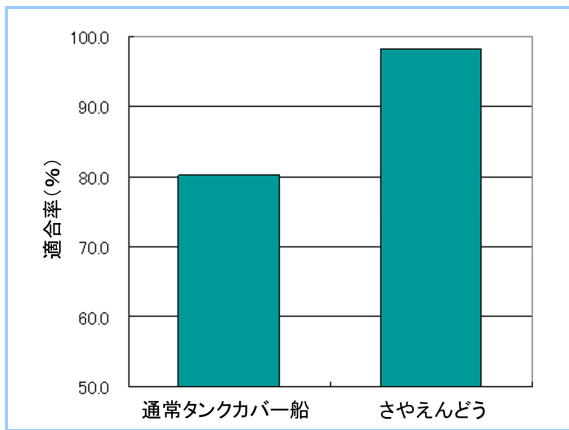


図2 165000m³型 LNG 船のターミナル適合性比較

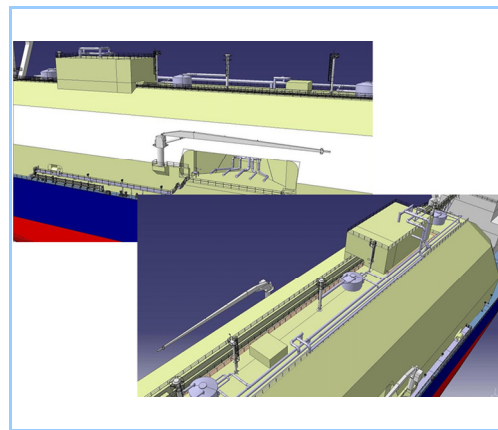


図3 CATIA による配置検討例

2.3 寒冷地/砕氷船への適用

“さやえんどう”は，氷などの接触による外板の変形影響を受けにくい独立タンク方式をベースにしていること，サポートや艀装品の露出を少なくできること，全体強度の面において氷による衝撃荷重にも有利であることなどから，寒冷地向け，氷海領域向けの LNG 船にも適した方式であると考えられる。

図4に砕氷 LNG 船のイメージを示す。また，冰山衝突時のシミュレーション計算を実施し，タンクの健全性も確認している。(図5)



図4 砕氷 LNG 船 (イメージ図)

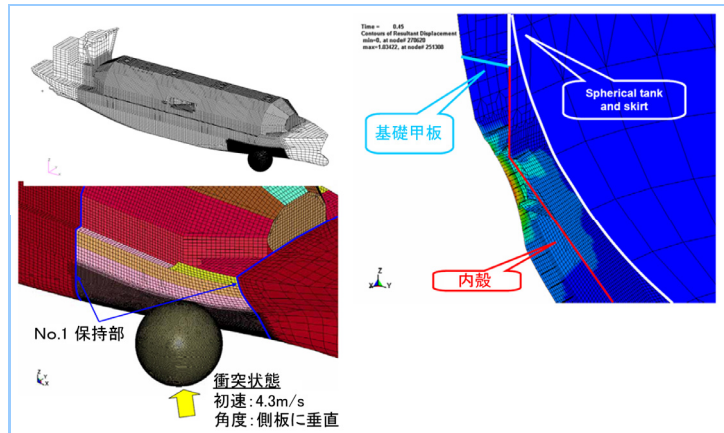


図5 冰山衝突(直径 10m を仮定)に対するタンク安全性の確認

3. 技術評価

3.1 構造強度評価

当社が従来採用している円筒と半球の組合せによるタンクカバーは，カバーの柔軟性により船体とカバーの相互干渉力をできるだけ少なくし，信頼性を上げる発想に基づいている⁽¹⁾。従来構造ではカバー重量の全体強度への寄与分が少ないが(ただし捻り剛性には大きく寄与している)，その一方で，構造設計的にはシンプルであり，合理的な設計である。

“さやえんどう”では，カバーと船体が一体化することにより，船体とカバーを合わせた鋼材の最適配置により重量軽減が可能であるが，その新規性にかんがみ下記の検証が必要である。

- (1) 全船モデルによる，波浪荷重・構造応答一貫シミュレーションによる検証
- (2) カバー自身の強度評価

(1)については，当社で開発された最先端構造解析プログラム MHI-DILAM を適用することにより，構造信頼性評価を実施した⁽²⁾。

MHI-DILAM による構造評価の例を図6に示す。(2)のカバー自身の強度評価については、特にカバー頂上の板・骨の座屈強度評価、船体とカバー接合部の疲労強度評価を実施し、十分な信頼性を確保できることを確認している。

上記に加え、主要船級協会(LR 及び DNV)のガイダンスに基づく構造強度評価も実施し、要求規則を満足することを確認している。

3.2 配置安全性評価及びリスクアセスメント

“さやえんどう”の配置の新規性について、主に配置設計上の安全性の観点から主要船級協会と協議を行い、LR/DNV/NK/ABS の各船級協会より AIP(Approval In Principal)を取得した。

これに加え、新規要素への対応策として、マニフォールド付近の配置に関するリスクアセスメントを実施した。“さやえんどう”ではマニフォールド及び関連配管の一部がカバー構造で覆われているが(図7)、これは寒冷地における作業においては有利である一方、周辺の換気/ガス検知/消火等について慎重に評価する必要がある。このような新規構造に関しては、安全性を客観的に評価しておく必要があるため、ロイド船級協会(LR)の監督・指導の下、HAZID(HAZard IDentification)と呼ばれる手法によりブレンストーミングを実施し、想定される事故シナリオに対して、従来設計と同等以上の安全性を確保できることを確認している。

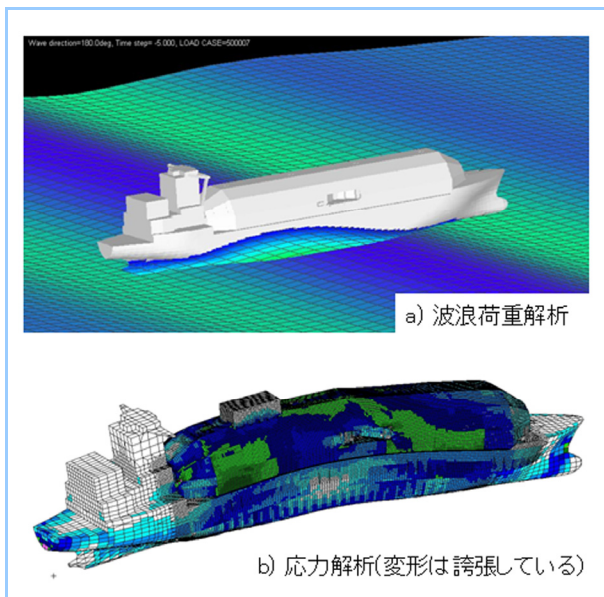


図6 最先端構造解析プログラム MHI-DILAM による構造検証

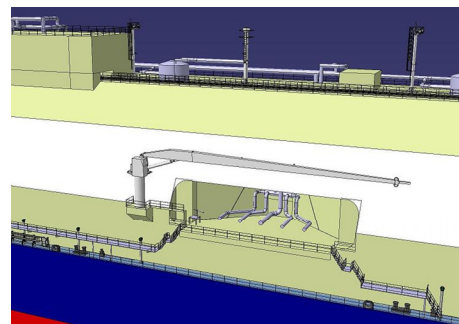


図7 “さやえんどう”マニフォールド配置

3.3 操縦性シミュレーション

LNG 船における港内操船性は、船舶を制御できずにターミナル側の設備を損壊した場合、ターミナルが使用できなくなる等の被害が甚大であるため、LNG 船における主要性能の一つとして挙げられる。大型化を考える場合、風圧力の増大による港内操船性の悪化が懸念されることに加えて、“さやえんどう”は従来型タンクカバー船に比べ風圧面積が増加するため、詳細な検証が必要である。より厳密に操船性の検証を行うため、風圧力に関しては詳細模型による風洞試験を実施した。その結果、正面($\beta=0^\circ$)からの風に対しては連続カバー効果により大幅な抵抗低減となり、真横から受風した場合($\beta=90^\circ$)はほぼ従来型と同等の風圧力係数となった。

操船性に関しては、第三者に評価してもらうため、(株)日本海洋科学にシミュレーションを依頼し、操船シミュレーターを用いて風洞試験で確認した風圧力特性及び潮流の影響を加味した状況で、船長経験者による操船シミュレーションを実施した。その結果、従来型タンクカバーと同等の操船性を有していることを確認した。なお、操船性の検討に関しては、球形タンク LNG 船で計画されている最大船型となる 177km^3 型の LNG 船を対象に検証している。シミュレーションの状況を図8に示す。



図8 操船シミュレーション

3.4 環境性能評価

“さやえんどう”は、従来型タンクカバー船に比べ、物量減・燃料消費量減により CO₂ 削減が期待される。“さやえんどう”をベースに高効率型タービンプラントを採用して省エネ化を図った次世代船を計画し、(独)海上安全技術研究所(海技研)に依頼し、建造、運航、解撤に至るまでの、船舶が一生涯中に発生するCO₂量をライフサイクルアセスメント(LCA)により比較した。なお、評価は海技研所有の“船舶用 LCA ソフトウェア”を使用し、航行時の推進性能、荷役時を含む各運航モードでのエネルギー使用、余剰ガスの処理に加えて、建造時・解撤時に掛かるエネルギーまで考慮している。前提条件及び評価結果を表2に示す。LCA を実施した結果、165km³型“さやえんどう”は 147km³ 従来型タンクカバー船に比べ、おおよそ 24%の CO₂ 排出量が低減できる結果となった。

表2 LCA 条件及び評価結果

運航期間	30年			
航路	日本～西豪州			
サービス速力	19.5kt			
ドック間隔	25日/2.5年			
不稼働日	設定しない			
貨物容積	147000m ³ 型	165000m ³ 型	165000m ³ 型	165000m ³ 型
タンクカバー形状	従来型タンクカバー	従来型タンクカバー	従来型タンクカバー	さやえんどう
主機	従来型蒸気タービン	従来型蒸気タービン	高効率蒸気タービン	高効率蒸気タービン
CO ₂ 排出 INDEX	100	84	80	76

4. まとめ

本論文では、球形タンク方式の信頼性を生かし、大型化、寒冷地向けにより有利な新船型として、連続カバーと船体の一体化による“さやえんどう”船型を提案し、種々の技術的評価によりその利点を確認した。“さやえんどう”は荷重構造一貫解析技術、安全性評価技術、性能評価技術など、当社の持つ最先端のシミュレーション技術を駆使して開発された船型であり、環境性能にも優れている。今後も多様化する LNG 輸送形態に応じ、開発、熟成を重ね、実用化を推進していく所存である。

参考文献

- (1) 高倉理ほか, 新世代 LNG 船の設計上の特徴と就航実績, 三菱重工技報 Vol.28 No.3 (1991-5) p.234~p.240
- (2) 佐藤 宏一ほか, 最先端構造解析プログラム MHI-DILAM, 三菱重工技報 Vol.47 No.3 (2010-7) p.92~p.98