

LNG 運搬船向けリンゴ型タンク構造の設計と工作

Structural Design and Construction Method for "Apple Shaped LNG Cargo Tank"



渡部 亨尚*1
Michihisa Watanabe

高田 龍祐*2
Ryusuke Takada

岡藤 孝史*3
Takashi Okafuji

辻井 浩*4
Hiroshi Tsujii

柏木 聖紘*5
Masahiro Kashiwagi

紙谷 洋一*5
Yoichi Kamitani

近年、発電用燃料として LNG (液化天然ガス) に対する需要が急増している一方、“シェールガス革命”と称されるように、シェール層からガスを採掘する技術の進歩により、米国を中心に新型の天然ガスの生産が拡大している。この天然ガスの需給拡大により、LNG の海上輸送量は大幅に増加する見通しである。現在、注目が集まる米国産シェールガスの輸送においては、パナマ運河拡張後の船舶サイズの制約、太平洋横断という長距離輸送が前提となるため、LNG 運搬船としては高い安全性、貨物積載効率の向上が重要な課題となる。当社では 2011 年に、“155km³型さやえんどう LNG 運搬船”を開発し、これまでに5隻を引き渡しているが、上述のお客様のニーズに答えるべく、信頼性に定評のある従来の MOSS 球形タンクの特長を継承した“リンゴ型タンク”の開発を完了した。2016 年 4 月時点で、リンゴ型タンク搭載の新型 LNG 運搬船を8隻受注しており、2015 年の 10 月よりアルミタンクの製造を開始した。

1. はじめに

当社は MOSS 型 LNG 運搬船の建造実績を積み重ねる中で、積載貨物容量の増大というお客様のニーズに応じ、従来の MOSS 球形タンクの大型化を進め、“155km³型さやえんどう”では、タンクの赤道部に円筒を挿入したストレッチタンクを搭載し、LNG 輸送効率の向上に取り組んできた。今回、LNG 輸送市場の大きな変革に際し、パナマ運河の制限に配慮しつつ積載貨物容量を増加させるべく、従来の安全性をそのままに進化させて、世界初の“リンゴ型タンク”の開発に成功したので、その技術内容について紹介する。

2. リンゴ型タンク

MOSS 型タンクの構造体は、球形が強度的に最も安定しておりタンク皮材の板厚を抑えることが可能なため、球形タンク方式が広く選択されてきた。その後、積載貨物量拡大を目的にストレッチタンクの採用が広がっている。一方、今回開発したリンゴ型タンクは、軸対称のタンク形状を採用しており、内圧をフープ応力で保持する考え方は従来と同様である。種類としては多数の建造実績を有する信頼性の高い MOSS 型タンクの一つで、IMO 独立タンクタイプ B に分類される。そのタンク形状は、球殻部、円環部、円筒部という異なる3つの要素の組み合わせにより構成されており、これにより形状および容積に関して高い自由度を実現している。

*1 交通・輸送ドメイン船舶・海洋事業部長崎技術部

*2 三菱重工船舶海洋(株)設計部

*3 総合研究所強度・構造研究部 技術士(機械部門)

*4 三菱重工船舶海洋(株)工作部 主席チーム統括

*5 総合研究所強度・構造研究部

今回のリング型タンクは、パナマ運河を通航するための船幅制限対応と、大容量化による輸送効率の改善という、相反するニーズの実現を目的として開発されたものである。例として、 180km^3 のリング型タンクと 155km^3 のストレッチタンクとの比較および 180km^3 球形タンクとの比較を図1に示す。リング型タンクを採用することにより、ストレッチタンクを搭載したLNG 船から船体サイズを大型化することなく、貨物容積を15%以上向上させることに成功している。

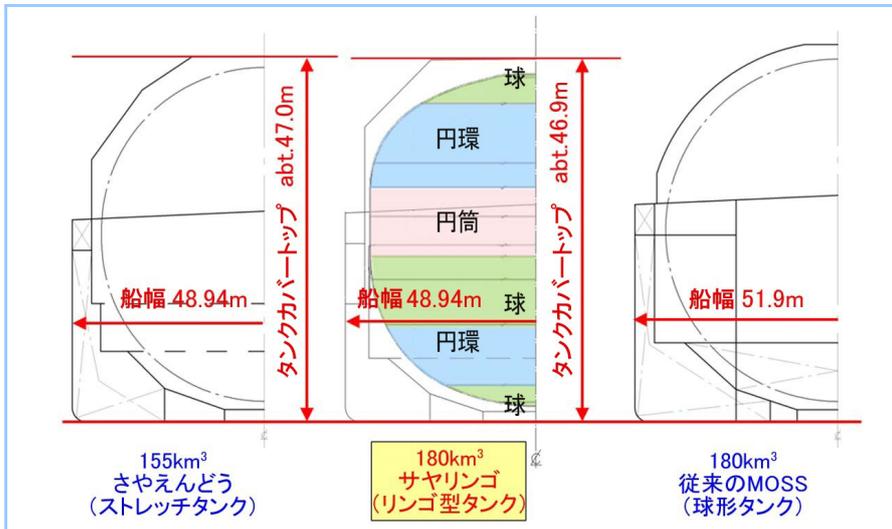


図1 タンク方式と船体サイズの比較

3. リング型タンクの開発

3.1 MOSS 球形タンクの構造設計

従来の MOSS 球形タンクの構造イメージを図2に示す。内構材のないタンク皮材を球形につなぎ合わせ、タンクの高さの中心位置付近をスカートと呼ばれる円筒型の部材で支持し、円筒スカートの下端は船体構造上に固定される。球形タンクの中心部には、配管や機器類、タンク内に入りするための交通装置が格納されているパイプタワーが上下方向に配置される。

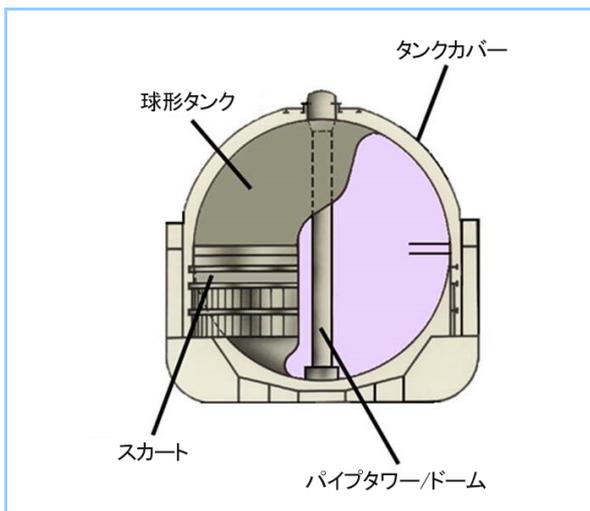


図2 MOSS 球形タンクの構造

従来の MOSS 球形タンクの構造設計は、IGC コード (THE INTERNATIONAL CODE FOR THE CONSTRUCTION AND EQUIPMENT OF SHIPS CARRYING LIQUEFIED GASES IN BULK) に規定される要件に適合する必要性が有り、実運航時のあらゆるオペレーションを想定し、船体動揺に起因する貨物の慣性力及びスロッシング荷重、タンク内が -163°C という極低温から常温まで温度変化することによる熱荷重等、様々な荷重に対する強度評価が実施されている。球形タンクは、主としてタンク皮材の膜応力によりこれらの荷重を支持するため内構材が不要であり、皮材の

みで安定的に荷重を支持することができる。実際の構造設計では、膜応力による延性破壊に加え、疲労破壊、座屈破壊、脆性破壊に対する評価も行われるが、さらに安全性を高めるために、万一のLNGの漏洩に対しても配慮がなされている。タンク皮材に初期き裂が存在すると仮定して進展解析を行い貫通までに十分な期間があること、さらに仮にき裂がタンク皮材を貫通した場合のシミュレーション計算を行い、LNGの漏洩量が部分二次防壁で処理可能な範囲であること、またガス検知器により微小き裂の状態でも早期に発見できることを確認している。この設計思想は、スモールリークプロテクションと称され、MOSSタンク方式及び一部の方形タンクに取り込まれている。

3.2 リンゴ型タンクの構造設計における課題抽出

リンゴ型タンクの構造設計においては、従来のMOSS球形タンクと同じレベルの信頼性を実現するために同様の強度評価プロセスを適用するとともに、形状変化による新たな破壊モードの検討およびその評価手法の確立が必要となった。MOSS球形タンクの設計フローを図3に示すが、形状の変化により影響を受ける、座屈強度とスロッシング荷重評価について検証が必要であると判断した。

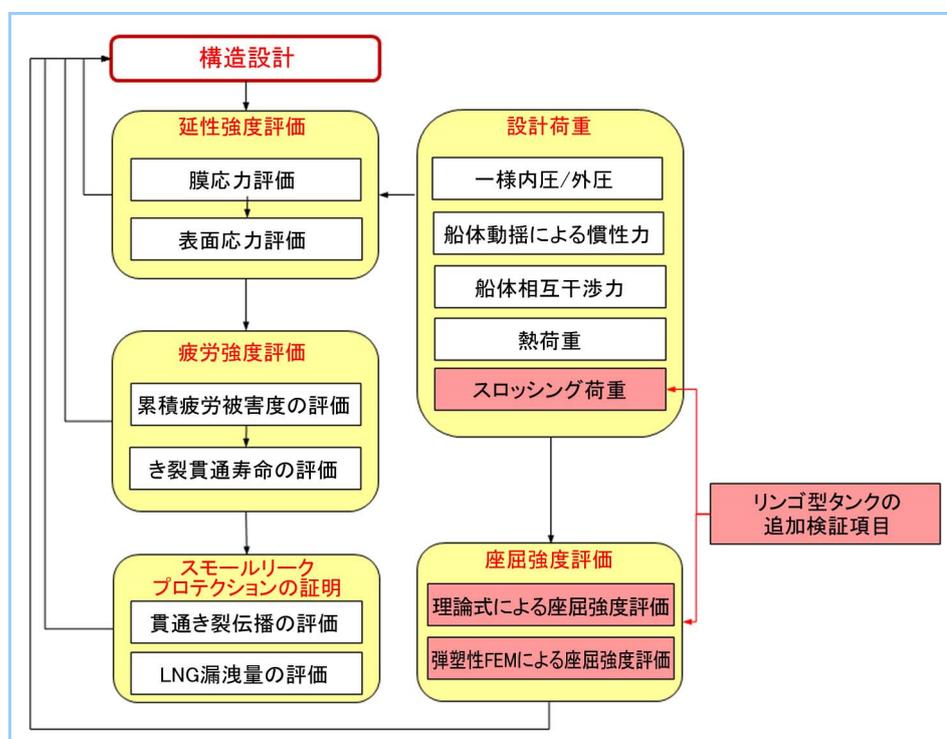


図3 MOSS球形タンクの設計フローとリンゴ型タンクの検証項目

3.3 座屈強度の検証

従来のMOSS球形タンクの耐座屈設計において評価すべき座屈現象は、外圧座屈と中間液位時の周方向圧縮座屈(流体運動により、液面付近のタンク構造が子午線方向に引っ張られる事に付随してタンク内側に引き込まれることで、周方向圧縮応力が発生する現象)の2種類であった。一方、リンゴ型タンクは、図4に示すとおり、球殻・円環・円筒の各部位で外圧・中間液位時の座屈評価が必要であることに加え、各部位の曲率差により、内圧負荷時に円環部で周方向圧縮応力が発生する“内圧座屈”の評価が必要である。また、円筒部位が長い場合は、満載時の船体運動(横加速度)により、円筒部にせん断座屈が生じる可能性がある⁽¹⁾。

これら想定される各座屈現象に対し、工作精度に基づく初期不整量を考慮した設計式と弾塑性大変形FEA(Finite Element Analysis)による評価を実施することで、設計荷重に対し十分な座屈強度を有していることを確認した。なお、リンゴ型タンク特有の座屈現象である内圧座屈については、実機タンクの約1/20縮尺モデルと、実機より円環部位の曲率が小さく内圧座屈が発生し易

いモデルの2種類で内圧負荷試験を実施した。各モデルに対する試験及び解析結果を図5に示す。円環部位の曲率が小さい座屈し易いモデルの試験では、試験と再現解析の座屈モード・座屈荷重はよく一致しており、弾塑性大変形 FEA の解析精度が検証された。また、実機縮尺モデルでは、設計内圧より十分大きい圧力に対して座屈が発生しないことが試験及び解析にて実証された。

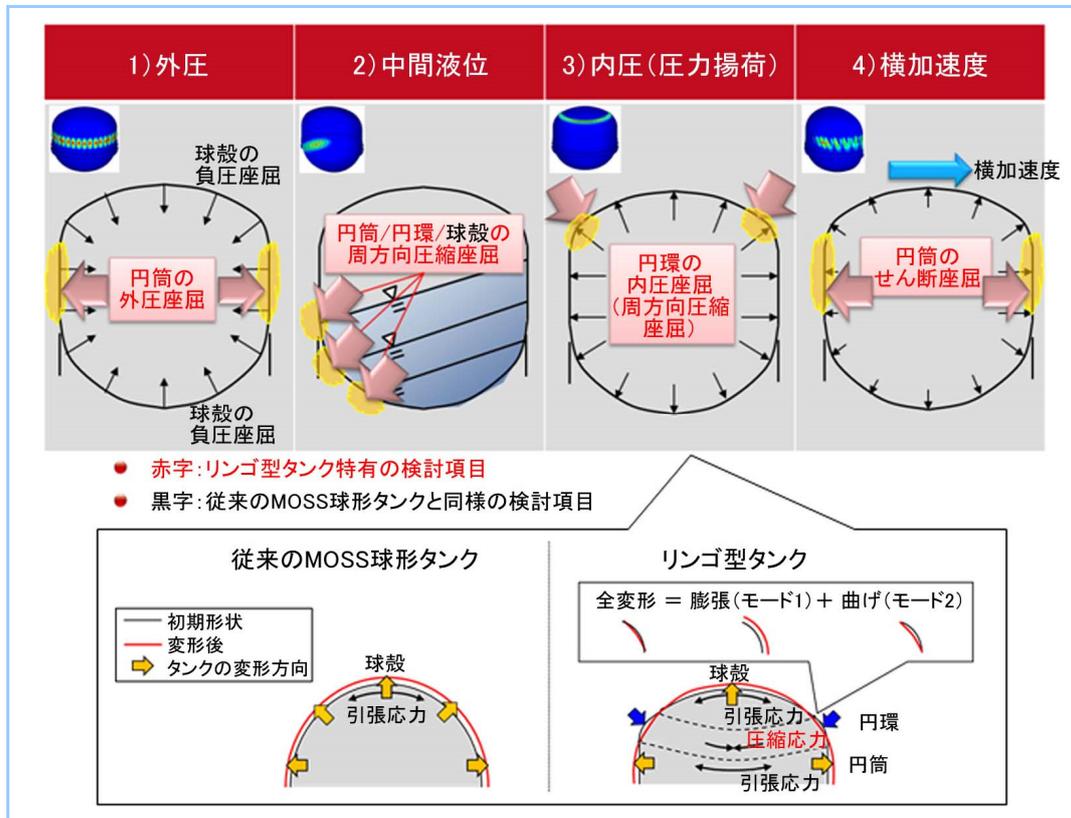


図4 リンゴ型タンクで想定される座屈モード一覧



図5 内圧負荷試験(1/20縮尺)及び再現解析の結果

座屈強度への影響が大きい因子である初期不整量と板厚については、球形タンクの施工実績よりそれぞれのばらつき(確率分布)を求め、座屈強度評価に用いた値の組合せが十分低い発現確率であることを確認した。更に、図6に示すように、各因子の値を確率分布に従う乱数として与え、座屈強度評価式にそれらの値を代入して座屈荷重計算を多数行う“モンテカルロシミュレーション”により座屈強度の確率分布を求め、破損確率を算出した。その結果、従来の球形タンクと同水準の初期不整量及び板厚管理を行うことで、リング型タンクの座屈による破損確率は、MOSS球形タンクと同等以下となる見込みを得た。この結果より、リング型タンクでは円環部と円筒部の精度管理値を従来のMOSS球形タンクと同程度として新たに設定した。

円環部は経度方向と緯度方向の曲率が異なり、かつ緯度方向の曲率も変化するため、球殻に比べて曲げ加工の工作難易度は高くなる傾向にあるが、後続の4.2節で示す曲げ加工試験を通じて球形タンク並みの曲げ精度確保に問題は無く、今回開発したリング型タンクは従来のMOSS球形タンクと比べて同等以上の座屈強度を有したタンク構造であることが確認された。

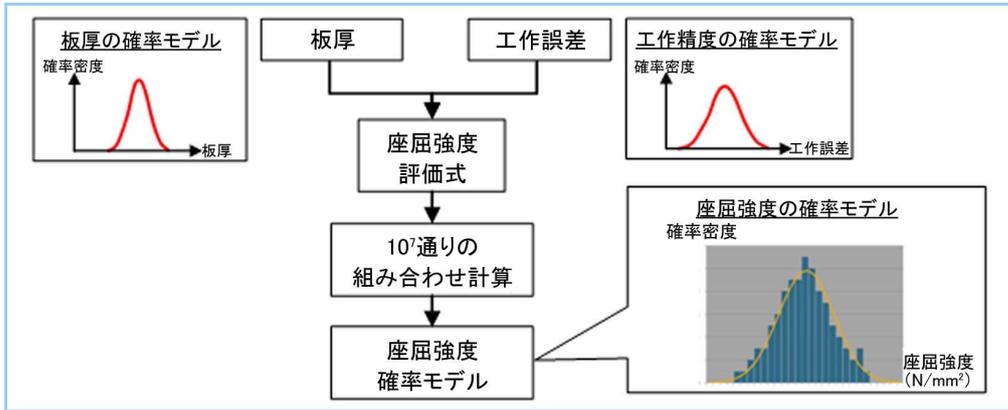


図6 モンテカルロシミュレーションによる座屈強度確率分布の算出

3.4 スロッシングに対する強度検証

スロッシングとは、自由表面をもつ液体の振動現象であり、特定の積み付け・LNG 液位・海象条件によってタンク内の液体が激しく運動してタンク壁面に衝突し、大きな衝撃圧を生じる。従来のMOSS球形タンクでは、その曲面形状から液体がタンク壁面に沿って運動するため、メンブレン方式等の方形タンクと比べ、スロッシングによる衝撃圧は小さく、問題にならない。リング型タンクも圧力の集中の無い滑らかな形状であるが、球形タンクから緩やかな形状変化を伴うため、従来と同様に優れたスロッシング特性を有していることを念の為検証した。

今回、スロッシング特性を議論するにあたり、規則加振及び不規則加振による検証を実施した。規則加振とは、加振振幅・周期を一定とした評価手法であるが、近年では数値シミュレーション技術が急速に進歩しており、より実際の現象に近い、船体運動を考慮した不規則加振によるスロッシング評価が可能となっている。

まず、社内にて加振振幅、周期を一定とした規則加振による模型実験及び数値流体力学 (CFD 解析) による評価を行い、開発対象としたリング型タンクと球形タンクの2つのモデルを用い、スロッシング荷重の比較を行った。模型実験により解析精度を検証し、実船向けのリング型タンク形状において、スロッシング荷重は球形タンクと同レベルであり、荷重増分としては 10%以内に収まる事が確認された。

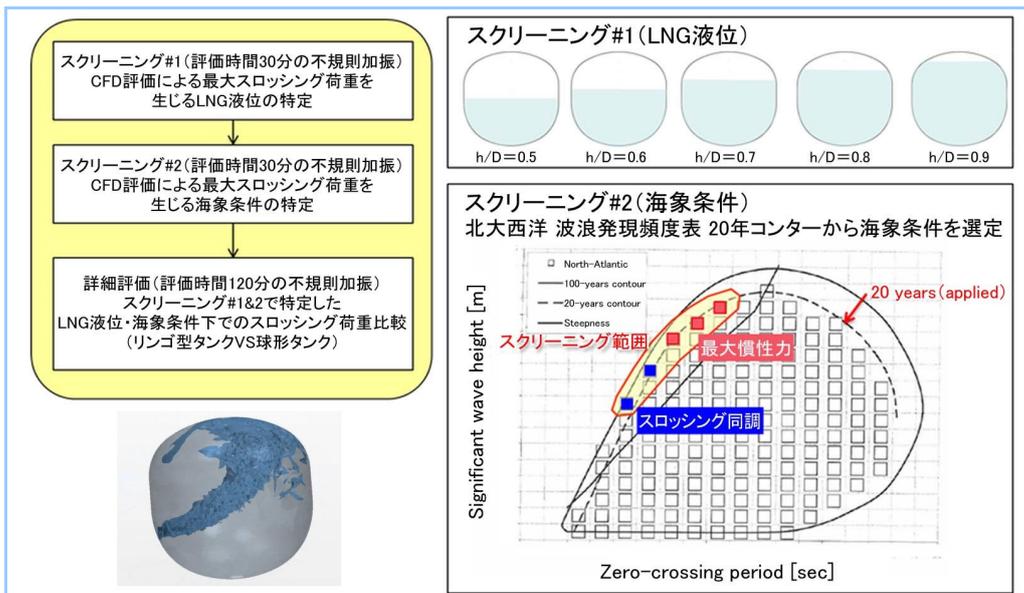


図7 不規則加振によるスロッシング評価手法

次に、不規則加振条件でのスロッシング評価技術を持つ DNV-GL^(注)においてスロッシング荷重の評価を実施した。不規則加振による評価手法を図7に示す。本評価では、スロッシング荷重が大きくなる条件の特定が重要となるため、まず、実時間 30 分程度の不規則加振による数値解

析を行い、最大荷重が発生する条件(船体の積み付け、LNG液位、海象条件)をスクリーニングした。特に、海象条件の特定にあたっては、タンクの固有周期に近い海象と、船体運動による慣性力が大きくなる海象の双方の評価を行わなければならない。スクリーニング解析により特定した最大スロッシング荷重を生じる条件を用い、リング型タンク及び球形タンクの2つの解析モデルに対し、実時間2時間の不規則加振による詳細解析を実施し、スロッシング荷重の比較を実施した。得られた結果は、当社検討結果と良く符合しており、規則波加振による実験・解析、不規則波加振による解析のいずれの評価においても、両者のスロッシング荷重が同レベル(増分 10%以内)であるという結論を得た。この評価結果に基づき、リング型タンクの設計においては、球形タンクのスロッシング荷重に対し、10%の荷重増分を考慮した安全側の強度評価を行っている。

(注)DNV-GL: 認証、技術コンサルティング、船級などのサービス・プロバイダー

4. リング型タンクの製造法

4.1 従来の MOSS 球形タンクの製造法との違い

従来の球形タンクの建造は、素材となるアルミ平板を花びら状に冷間でプレス曲げ加工を行い、これを MIG 溶接で継ぎ合わせて球形タンクを建造する。花びらの形状は球形タンクの場合は緯度・経度のどの方向も同じ曲げR(半径)となる球形であったが、リング型タンクの一部の花びらは緯度方向の曲げRは一定であるが、緯度方向の曲がりが経度とともに曲げRが変化する円環形状を採用した。そのため、花びらの冷間プレス曲げ加工において、リング型円環花びらは緯度と経度方向の曲げRが異なり、さらに緯度曲がり経度とともに変化するもので、常に曲がりの状態を確認しながら花びら曲げを行うことが必要となる。そのため、この複雑な曲げのメカニズムを小型模型による曲げ試験でシミュレーション検討を行い、その結果に基づき、最適金型形状、加圧条件を選定し、曲げ工法を確立させた。

また、花びらの組立工程においては、曲げ加工の後に開先加工を行った花びらを4枚まで大電流自動 MIG 溶接で大組ブロックとし、次にこのブロックをさらに球形タンクの北半球・赤道帯・南半球の3分割の総組ブロックとし、建造ドック内で3分割の総組ブロックを球形タンクに組み上げる。リング型タンクの円環部位においては、緯度と経度方向の異なる曲げRに対応させるため、新型の数値制御3次元開先加工機、大組大電流自動 MIG 溶接板継用ポジショナーのユニバーサル支柱治具、総組時の拘束架台、円環部曲がりR専用の自動 MIG 溶接機のレールを新たに製作し、実船建造に供する予定である。

4.2 円環部の曲げ加工

アルミ花びらはサイズが大きいため、プレス成形装置の都合上、真球・円環に関わらず複数回のプレス曲げを行って成形する必要があるが、複数回プレス加工とその形状推定を対象とした研究例はほとんど無い。今回は1回のプレス成形を想定した非真球面のスプリングバック推定式⁽²⁾やシミュレーションにより、いくつかの候補形状を挙げ、その候補形状に対応した1/20スケールの金型模型を制作、複数回プレス曲げを行って形状を評価した後、実船向けの金型形状を決定した。1/20スケールの小型金型模型を図8に示す。

小型金型模型を用いたプレス実験では、板寸法もすべて実物の1/20倍とした。プレス荷重は曲げ応力に関係し、また、曲げ応力は板厚の2乗に反比例するため、プレス荷重は実物の1/400倍とした。プレス後の形状については、画像相関法を活用した三次元変形計測装置 ARAMIS を用いて計測した。プレス後の1/20スケールアルミ花びらを図9に示す。表面には ARAMIS による計測のための白いペイントを施している。ARAMIS による計測結果を図10に示す。また図10の計測結果を用いて算出した、経度方向各位置における、緯度方向の曲率半径を図11に示した。プレス実験の結果、図面形状に最も近い金型Aを採用し、これに基づいて実船向けの金型を製作し、検証のための実大試作試験を行った。試作の結果を図11に示した。その結果、曲率半径が小さめとはなったが、ほぼ想定どおりの曲面形状が得られた。現在、目標形状が得られるようプレ

ス荷重の調整を行っており、板毎の形状ばらつきを把握したうえで、安定品質が得られる標準プレス条件の確立を目指し、データの取得を行っている。

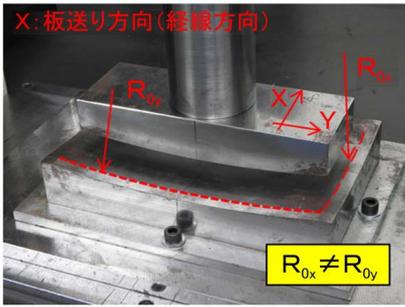


図8 1/20 スケールの小型金型模型

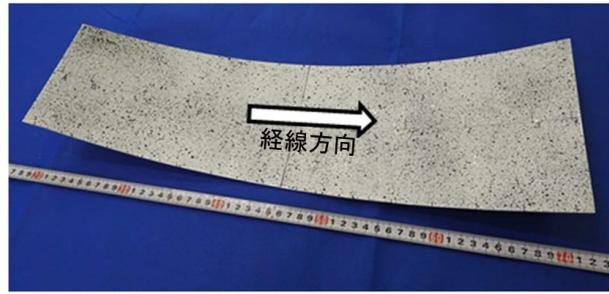


図9 小型金型模型により成形したアルミ花びら

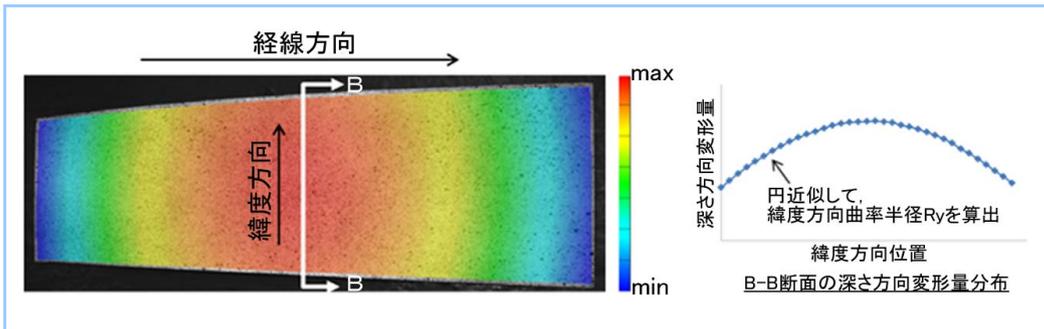


図 10 ARAMIS による計測結果 (深さ方向変形コンター図)

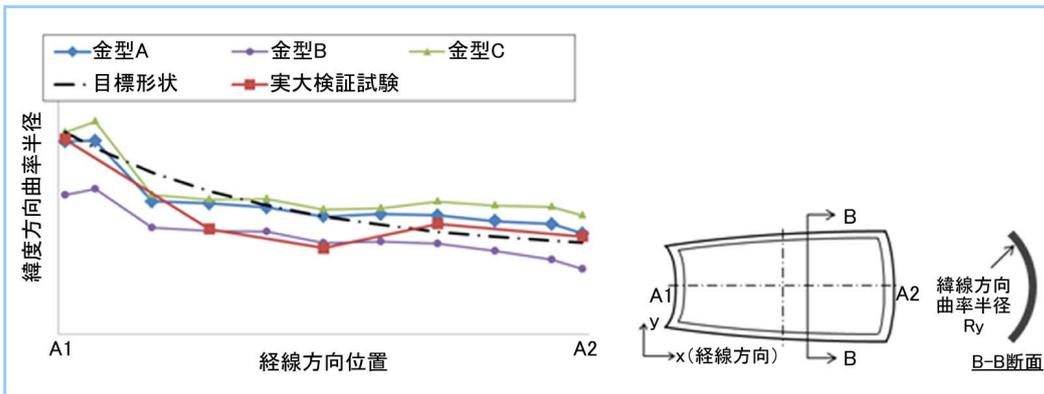


図 11 プレス実験および実大検証試験結果

5. まとめ

当社は、積載貨物量拡大、輸送効率の向上というお客様のニーズに対して、従来の球形MOSSタンクを進化させたリング型タンクを提案し、形状変化に対する種々の技術評価を行った結果、新型タンクの設計プロセスを確立することに成功した。リング型タンクは、従来のMOSS球形タンクと同等の座屈強度および優れた耐スロッシング特性を有し、更にタンク形状をフレキシブルに設計可能である。今後の多様化するLNG輸送のキー技術としてLNG船の設計に適用し、国内外のLNGサプライチェーンに積極的に貢献していく。

参考文献

- (1) ASME/BPVC CASE N-284-2: N-284-2 Metal Containment Shell Buckling Design Methods, Class MC Section III, Division 1
- (2) 西岡ら, ユニバーサル多点プレス法による船体外板曲げ作業の自動化に関する研究: 第1報: 基礎的研究, 日本造船学会論文集(132), 481-501, (1972)