



時代をリードする製品と 構造強度技術

製品の信頼性を支える構造強度技術の歩み

“社会が求める時代に先駆けた製品を”というのが IHI 創業以来の企業風土である。ここでは、構造強度技術が重要な役割を担って世に送り出した製品を中心に、技術的発展の跡を振り返る。

高度にシステム化された現代社会では、それを支える社会インフラ・機器の構造健全性確保は重要課題の一つである。このため IHI では常に最先端の構造強度技術の開発に取り組んできた。ここでは、石川島播磨重工業（現 IHI）が発足した 1960 年以降について、振り返ってみたい。

1. 鋼構造物の大型化の時代 （1960 年～1980 年）

1960 年前後から、日本は重化学工業の本格的発展期を迎えた。エネルギーの主役が石炭から石油へと大きく転換した時代でもあった。これに対応して、原油輸送タンカーの巨大化に代表されるように、「鋼構造物の大型化」が進んだ。IHI は、タンカーの大型化で世界をリードし続け、1975 年には世界最大の 48.7 万 t「日精丸」を完成させている。

陸上では、球形ガスタンクなどの大型化が進んだが、これには従来の鋼材よりも画期的に強度を上げた高張力鋼が大きな役割を果たした。IHI では、材料技術に溶接技術と構造強度技術も加わって、これらの分野の技術者・研究者が協力して高張力鋼を安全に適用していくための技術課題を克服した。これにより、技術面で業界をリードしただけでなく、球形ガスタンクについては 1970 年代半ばまではほぼ独占に近い供給実績を挙げ、「大型構造物の IHI」という評価を定着させていった。

構造強度技術の分野では、高張力鋼溶接継手の破壊強度評価のために、球形タンクなど実構造物の一部を切り出した大型の試験法を世界に先駆けて実施した。これにより破壊強度が定量的に評価できることを明らかにし、この知見は球形ガスタンクの施工基準に反映された。さらに、この試験法は大型構造物の継手強度評価法として業界でも広く使用された。

IHI が開発した低温貯蔵タンクの分野では、何と言っても 1970 年に世界で初めて実用化に成功した液化天然ガス（LNG、主成分メタン、 -162°C ）地下タンクが挙げられる。これは、地中に円筒平底の鉄筋コンクリート外槽を設け、保冷層を介してステンレス製のメンブレンと呼ばれる薄板を敷き詰めた魔法瓶構造をとるタンク形式である。このメンブレンには、およそ 200°C に及ぶ温度差による熱変形を吸収するためにコルゲーションと呼ばれるひだが一定間隔で設けられているが、最大の課題は、熱変形と液圧変動の繰り返しに対する疲労強度であった。メンブレンの代表的な構造部位に対する膨大な数の疲労試験を実施したが、この疲労強度評価手法は業界の設計指針にもなっている。この LNG 地下タンクは、1970 年代終わりごろまでは IHI がほぼ建造を独占していた。その後、他社の参入でシェアは低下したが、最大容量タンクは常に IHI が建造するという流れは今も変わらない。



最新の技術を結集し大容量化を実現した世界最大 25 万 KL の LNG 地下タンク（2013 年完成）
（東京ガス株式会社扇島工場向け TL22LNG 地下タンク）

1970 年代は、コンピュータを駆使した構造解析法（有限要素法）の実用化が促進された時期でもあった。特に、船舶の構造計算では、複雑な補剛材をモデル化した詳細な船殻構造解析技術が長足の進歩を遂げた。IHI では、常に最先端の大型コンピュータを導入するとして経営トップの方針があり、この構造解析技術の発展を支えた。コンピュータによる構造解析技術は、原子力機器、ボイラ、貯蔵タンクや大型クレーンなど広い分野の IHI 製品の構造設計に活用されていった。

2. 事業構造転換模索の時代 （1980 年代～2000 年代はじめ）

1973 年の第一次オイルショックに端を発した造船不況の始まりおよび日本の経済成長に伴う円高の進行、さらには韓国など新興国の台頭により、1980 年前後から日本造船業の国際競争力は大幅に低下した。さらに、貯蔵プラントのような大型構造物の分野でも、先進技術の適用で築かれた IHI の優位性に陰りがみられるようになってきた。この時期、日本の産業界では、「重厚長大」から「軽薄短小」へという言葉が頻繁に聞かれる

ようになり、電子産業などの将来性がもてはやされるようになった。このようななかで、従来の「大型構造物の IHI」という事業構造について転換が模索されたが、これに対する IHI の取り組みの一つが高付加価値の大型構造物製品への注力であり、さらには新素材の開発による機械製品の高性能化であった。

大型構造物の高付加価値化で一定の成果を上げた代表例はコンテナ船である。1960 年に登場したコンテナ船は 1970 年ごろから専用港湾設備の整備とともに本格的に就航するようになったが、その後の急速なコンテナ物流の進展に伴い、大型化が求められるようになった。コンテナ船では、コンテナ積載作業のため甲板に広い開口部を有するので、構造強度の確保が大きな技術課題であった。波浪荷重に対する船体の構造応答を精度よく求めるために威力を発揮したのが先にも述べた大型コンピュータを駆使した構造解析技術であった。ごく最近まで、IHI が建造したコンテナ船大型化の歴史が世界のコンテナ船大型化の歴史であり、また建造シェアも世界のトップクラスを維持する時代が長く続いた。



超大型コンテナ船
(提供：ジャパン マリンユナイテッド株式会社)

LNG 船の分野では、独自の自立角形タンク方式の SPB (Self supporting Prismatic shape IMO Type B) LNG 船を開発、1983 年に各国船級協会の認証を取得した (石川島播磨技報 Vol. 34 No. 4 「 SPB LNG 船 」 小特集号)。当時の LNG 船は極厚板アルミ合金製球形タンクを搭載するモス方式が主流になりつつあったが、IHI が開発した SPB タンク方式は船殻構造と同様の板骨溶接構造のアルミ合金タンクを船殻内に収納するもので、船体のスペースを最大限活用できるという利点があった。

SPB タンク開発における最大の技術課題は、溶接継手部の疲労強度が十分安全なレベルにあることを示すことであった。当時の業界では技術的に困難であると見られていたが、IHI は材料試験片レベルに始まり、各種溶接継手構造および大型構造模型の膨大な疲労試験データを蓄積し、溶接継手部の応力集中を考慮した疲労強度評価手法を確立した。

1993 年にアラスカー日本間の輸送航路に就航した SPB 方式 LNG 船 2 隻は、今日に至る 20 年余り順調に運航されており、構造強度技術の信頼性の高さが実証された形になっている。しかし、その後の建造が続かず、事業としての雌伏の時代が続くことになった。

一方で 1980 年代は、IHI の航空エンジン事業が、150 席クラス旅客機用 V2500 エンジン国際共同開発への参加を通じて民間エンジン事業に進出した時期でもあった。この時期、ジェットエンジンやガスタービンへの適用を念頭に、チタンアルミなどの金属系新素材に

加えて、繊維強化プラスチック (FRP : Fiber Reinforced Plastics)、ファインセラミックスとセラミック基複合材料 (CMC : Ceramic Matrix Composites) などの研究開発が精力的に推進された。FRP は、V2500 エンジンでノーズコーンなどに適用され、製造技術や構造設計技術などの蓄積が進んだ。また、耐熱性に優れるファインセラミックスを適用した国家プロジェクトとしての 300 kW 級セラミックガスタービンの研究試作に主導的に参加し、続いてセラミック材特有のもろさを克服する CMC の開発に取り組んだ。しかしながら、これら新素材の航空エンジン主要部品への適用を目指した開発が本格化するのには 21 世紀に入ってからであった。

3. エネルギー構造転換に伴う新たな飛躍の時代 (2000 年代中ごろ～)

IHI が事業構造の転換を模索した 1980 年代はじめから 2000 年代中ごろまで、原油価格は平均して 20 ドル／バレルの安定した状態で推移した。しかし、2000 年代中ごろからの原油 100 ドル／バレル時代の幕開けは、シェールガスと呼ばれる新たなエネルギー源の登場を促し、“石油の時代からガスの時代へ”というエネルギーの転換が起きている。このような状況が、過去 20 年余りの「模索の時代」に IHI が培ってきた技術が事業に開花するチャンスをもたらしている。

建造実績が 2 隻にとどまっていた SPB 方式 LNG

船も、波浪条件が厳しい太平洋横断シェールガス輸送の増大を受け、新たに2隻の大型船建造が決まり、これを皮切りに再び世界に打って出ようとしている。また SPB タンクそのものは、今後増えると期待される浮体式ガス生産貯蔵積出し設備の貯蔵タンクのほか、シェールガス燃料船の燃料タンクへの採用が大きく進むと予想される。このような多様な用途を念頭に SPB タンクの構造強度技術の開発は今現在も続けられており、疲労強度を大きく左右する溶接継手部の残留応力を解析する手法などが実用化されつつある。

航空エンジンの分野では、燃料価格の高騰によりエンジンの燃費が航空会社の競争力を大きく左右するほどの状況が生まれた。その結果、従来の金属材料に代わり、より軽量で必要な強度を満足する炭素繊維強化プラスチック (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics) が翼やファンケースなどの主要エンジン部品にも適用されるようになってきた。

CFRP は強度特性が金属材料と大きく異なる。航空エンジンに要求される高い構造信頼性を実現するために、疲労強度、衝撃強度 (例えば鳥がエンジンに飛び込んだ場合など) を評価できる CFRP に特有の試験技術お

よび構造解析技術を必要とする。平板試験片を用いた基礎試験から始まり、部品単体、実エンジンの各レベルについて詳細な実証試験および構造解析が実施されている。

IHI は、この分野の技術力の高さも評価されて、画期的な燃費改善を目指した 150 席クラス旅客機用新型エンジン PW1100G-JM の国際共同開発に参加しており、ファンケースとこれを支える構造案内翼 (SGV : Structural Guide Vane) など IHI が設計・製造する CFRP 部品を搭載したエンジンが世界中を飛び回る予定である (IHI 技報 Vol. 53 No. 4 ジェットエンジン特集号)。

CFRP に加えて、近い将来における航空エンジンタービン翼への適用を目指して、耐熱性と強度に優れた CMC の開発と強度特性の確認およびこれを考慮した構造設計手法の確立にも取り組んでいる。

これら複合材の航空エンジンへの適用推進という最近の状況は、高張力鋼を適用し球形タンクなど大型構造物の世界を切り開いた 1960 年代のそれに似ていると思われる。まさに“技術の IHI”らしさを活かせる時代が到来していると言えるであろう。



複合材ファンケース

PW1100G-JM エンジンおよび複合材ファンケース
(提供: P&W 社)