

ケミカル・液化ガス運搬船の揺籃期

— 主として艤装関係 —

岡本 富保, 桂 豊

1. はじめに

日立造船では1959年(S34)頃からケミカルや液化ガスのバラ積船を手がけ始めた。翌年には加圧式LPG船第一ふろばん丸を建造し、1961年(S36)には冷却式LPG船日石丸の改造工事を始めている。

その後大型の冷却式LPG船を続々建造し、看板船種の一つとして高く評価されるようになった。

一方1963年(S38)頃から塩ビモノマー、アセトアルデヒド、アンモニアなど色々の化学物質をバラ積する専用船を開発、建造した。

ここではガス船の揺籃期とも言える数年間の開発状況に関し、筆者らの担当した荷役装置、再液化装置、防熱装置など、主として艤装関係について、断片的ではあるが報告することとした。

「4.6 タンクの防熱(硬質ポリウレタン現場発泡工法の開発)」は岡本が、その他は桂が、それぞれ執筆した。

なお、当時の慣習から単位はCGS系、圧力は特記以外ゲージ圧とした。

2. BTX 運搬船 第十大成丸

共和産業海運(株)ご発注 315 総トン改造船
1960年(S35)2月完工引渡 桜島工場施工

日立造船におけるケミカル/ガス専用運搬船の歴史は本船をもって嚆矢とする。

船倉内にBTX(ベンゼン: C_6H_6 、トルエン: $C_6H_5CH_3$ 、キシレン: $C_6H_4(CH_3)_2$ (オルト・メタ・パラの3異性体あり)合計5種類の総称)専用タックを備えた内航ケミカル船である。常温常圧、錆を嫌うためタンク内面をステンレス、外面を軟鋼として貼り合わせたクラッド鋼を使用した。

亀の甲とのご縁は、入試の折、休憩時間にたまたま見たキシレンの異性体が出題されるという幸運を桂が経験していたが、実務では本船が最初である。

3. 加圧型LPG運搬船 第一ふろばん丸

共和産業海運(株)ご発注 654 総トン新造船
1960年(S35)4月起工/同年11月引渡 桜島工場建造

3.1. 初のLPG船

共和産業海運(株)から第十大成丸に引き続き160t積みLPG(Liquefied Petroleum Gas)専用船をご発注頂いた。プロパン(C_3H_8)、ブタン(C_4H_{10})を常温のままバラ積みする日立造船初の加圧型内航LPG船である。

LPGタンクは設計圧力 20kg/cm^2 、 90m^3 の横円筒型タンクを2つの船倉に2基ずつ計4基搭載した。

本船の商談当時、プロパンを積める本格的なLPG船として飯野重工(現日立造船舞鶴工場)が飯野海運と商談中であつた。この船が桃邦丸で、1960年(S35)6月の起工ながら完工が同年10月と早く国内1番船、第一ふろばん丸は2番船となつた。

桃邦丸より9ヶ月前に播磨造船所(後のIHI相生造船所)で第一えるび丸が完成したが、この船はブチレン(C_4H_8)やブタジエン(C_4H_6)を主な積荷とし、タンクの設計圧力は 7kg/cm^2 と低い。同社のご好意で見学が許され、参考にさせて頂いた。

3.2. 荷役

問題は揚荷役の方法と機器の容量である。

遠心ポンプは吸込側に押込圧(Net Positive Suction Head Required, $NPSH_R$ と略称)が必要であるが、加圧液化ガスは飽和状態にあり、通常の液体のように大気圧の作用を受けられないので、吸込側には押込液柱を与えるとともに配管抵抗を小さくしなければならない。また、安全上の見地からタンクを置いた船倉内を配管して直接ポンプに導くことが許されない。

現在では低 $NPSH_R$ 型ポンプと駆動用モータを一体として積荷液体中にどぶ漬けする「サブマージド・ポンプ」が一般的であり、長い軸を介して甲

板上のモータで駆動する「ダイブウエル・ポンプ」が使われることもあるが、その頃このような形式のポンプはまだ入手できなかった。

「アメリカの鉄道輸送ではローリ車の荷役は圧縮機で圧送する」との資料があったが、船では陸上タンクへの輸送距離が長く、大きい差圧が必要故、圧縮機のみでは圧送が困難である。第一えるび丸は圧縮機（ペーパー・ポンプと呼ぶ）とポンプを併用する方式、我々も同様の方式を採用した。後に桃邦丸も同様であることが分かった。

LPG は圧縮機で一旦甲板上に設けた中間タンクに圧送された後、下部に置いたポンプで陸上へ送られる。圧縮機とポンプの容量バランスは、中間タンクの「液面制御装置」が圧縮機のバイパス弁とポンプの吐出弁を自動制御して行うもので、中北製作所の力作。ショップテストで空気圧制御の作動状況は確認していたものの、実ガスによる荷役を見るまでは心配だった。揚荷が始まると圧縮機が勝ち気味で、液面は設定した標準レベルよりは少し上がっていたが、実に安定した運転で安心した。サーモスタットやマグネットバルブは冷蔵庫の温度制御や冷凍機の自動運転でお馴染みであるが、危険な液化ガス、それもオンオフではなくノズルフラップを使った弁の開度制御、船舶オートメ化の黎明期としてなかなかのものであった。

3. 3. 気液界面の凝縮

ここで分からないのがタンクの液面を加圧したときに生じるガスの液化現象である。

ブタン（ノルマル・ブタン： nC_4H_{10} 、イソブタン： iC_4H_{10} ）は蒸気圧が低い。特にノルマル・ブタンでは液化温度が約 $-0.5^{\circ}C$ と高く、冬場ではガソリンに近いような状態になるので、加圧するとすぐに液化するかも知れない。陸上での圧送を書いたアメリカの資料には「液面で凝縮して温度と圧力が上がる」とあるだけで定量的なことには触れていない。理論解明の方法は見出せず実験で確かめるにも時間がないので、大きい容量の圧縮機を使うこととした。他の例でも、ブタン系の積荷を扱う船は大きめの圧縮機としていたようである。

凝縮量に関する疑問はこのとき以来未解決のままで、長い間脳裏にくすぶっていたが、1976年（S51）に至り、日本造船学会の造船設計委員会（委員長小山永敏先生、幹事栖原二郎先生）のプロジェクト「P53 相変化を伴う液体の荷役」として取り上げて頂き、当時向島工場にいた桂が小委員会幹事を命ぜられ、IHI 呉・山上和政、川重坂出・田中

誠一、佐世保・長野達雄、三菱長崎・森田秀敏、日立造船向島・岡本昌治の各氏で構成されるチームで理論解明を試みた。栖原二郎先生のご紹介で九州大学生産科学研究所の藤井哲教授にも教えを乞い、実験データを頂戴した上、色々ご教示頂いた。机上のみではあるが1年半の研究の結果、山上氏の卓越した発案と展開が功を奏し、一応の解を得ることができた¹⁾。

3. 4. 研究結果の概要

圧縮機を出たガスはタンク内の液よりも高温となっており、ガスと液との境界面やタンク内壁面などで冷却されるとき、その一部が凝縮する。本研究は圧縮機容量決定の鍵となるこれら凝縮量の算定法を見出す目的で行われた。

問題点は気液自由界面ならびに固体面における気相から液相への相変化を伴う熱および物質移動現象である。気液界面についてはほとんど研究例がなく、系統的理論解明は初めてではとのこと。また、固体面については熱交換器など主として小径管に関する研究は盛んに行われているが、水平板や大径円筒などについては研究例に乏しい。

ここでは、まず固体壁面について、ヌセルトの層流膜状凝縮理論を出発点とし、これに乱流および不凝縮ガスの影響を考慮した実用式を求めた。

気液自由界面については、そのまま適用できる既成理論が見つからず独自の研究を行った結果、気液界面にガス境膜と液境膜があるとするルイス・ホイットマンの二重境膜理論に、熱移動・物質移動の変換に関するチルトン・コルバーンのアナロジー理論を結合させることにより解法を見出すことができた。すなわち、一般に熱移動と物質移動が同時に起こるときに、熱移動を知れば、ルイス数⁽²⁾を用いて物質移動に変換することができるが、これを自由界面の両側に存在すると考えられるガス、液両境膜に適用し、全体の物質移動量を得るというものである。

ノルマルブタンを凝縮成分（液相 97mol%）、プロパンを非凝縮成分（液相 3mol%）とする実在ガスなどをモデルに選んで試算し、次の結論を得た。

(1) システムモデルのタンク

壁面での凝縮に対して

- (a) 長さ 15m, 幅 9m, 深さ 9m の方形タンクと、
- (b) 長さ 15m, 直径 9m の水平円筒型タンクとし、

自由界面での凝縮に対して

(c) 直径 15m の球型タンクとした。
これらは計算上の便宜のためである。

(2) 固体壁面の凝縮

タンクおよび管について、内壁面の熱伝達率は $10^3 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ のオーダー以下であり、凝縮液膜の厚さは 0.5mm 以下である。

凝縮量は壁面とガスの温度差、非凝縮成分の濃度に影響を受ける。

タンク壁面での凝縮量に比べ管内での凝縮量は少ない。(試算例では 1/100 前後)

(3) 自由界面の凝縮

境膜の熱伝達率は大略ガス側 $10^0 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ 、液側 $10^3 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ のオーダーであって凝縮量はガス境膜の熱伝達率が支配的である。

たとえば、ガス境膜の熱伝達率を 10 倍にとれば凝縮量は約 7 倍に変化する。これに対して、液境膜の熱伝達率を 10 倍にしても、凝縮量は 10% 程度しか増加しない。

系の差圧と凝縮量はほぼ比例する。

(4) タンク内全凝縮量への寄与率

壁面と界面の寄与率は液面の変化とともに変化し、また、タンク形状の影響を受けるので一概には言えないが、壁面がほぼ支配的である。しかし自由界面が無視できるオーダーとは言い難く、物性、周囲条件などの影響も大きいので、常に両者を知る必要があると考えられる。

(5) 今後の課題

固体壁面の凝縮で、蒸気の接する固体壁全面に亘って凝縮が生じているとして計算しているが、日射など外的条件の影響はどうか。

自由界面の凝縮で、境膜の熱伝達率を垂直平板上の自然対流の式に係数処理を施したもので求めているが、実験的裏付けが必要である。また、境膜内分子拡散について、気相から液相への一方拡散と液相から気相への拡散も考慮した気液相互拡散の双方の考え方で検討したが、何れが現実に近いのか。さらに、実際の圧送荷役ではタンク内は自然対流ではなく強制対流が起こっていると考えられるが、この影響をどう扱うか。

本プロジェクトはやっと研究の途についた段階で終了した。机上検討で仮定条件も多く、上記の他にも多くの問題点を残している。

なお、この研究結果は低温型 LPG・LNG 船で温

度・圧力を自然上昇にまかせて再液化装置を省略するいわゆる「封じ込み」方式の研究²⁾にも関連が深い。もはや加圧型 LPG 船の荷役が圧縮機で行われる時代ではなくなり、その意味では本研究は役目を終えたが、低温型液化ガス船等で封じ込みが論じられる場合には、実験を含め更に展開する必要が生じるかも知れない。

注) Le (ルイス数) $\alpha/D = C \cdot \lambda / (\rho \cdot C_p \cdot D)$

ここに、 α : 温度伝播率 (m^2/sec)

D : 拡散係数 (m^2/sec), C : 定数

λ : 熱伝導率 ($\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$)

ρ : 密度 (kg/m^3)

C_p : 定圧比熱 ($\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)

3. 5. 反省

本船の設計思想は安全性・信頼性第一である。

何しろ初めての液化ガスで、それも爆発性の強いプロパンガスである。大事を取りすぎるきらいもあったが、当時としてはやむを得なかったことといえよう。三輪成歳男部長(当時、その後同社社長)にはたいへんお世話になったが、本船は順調に完工し、予定通りの性能と喜んで頂けた。

しかし、本船の揚荷装置は最悪のケースを想定したため、無駄も多い。ノルマルブタンがタンク内壁などで凝縮するのを恐れてタンクを船倉内に配置したり、防熱を施したりした上、圧縮機の容量も過大である。それでも客先、上司にご寛容頂いたのはたいへん幸せなことであった。

共和産業海運はその後アンモニア、セメント、硫酸等と種々の専用船をご発注になり、大層ご愛顧下さっている。まことに有り難く、技術屋冥利に尽きることである。

4. 冷却式 LPG・原油混載船 日石丸

東京タンカー(株)ご発注 16640 総トン改造船 1962年(S37)3月完工引渡 因島工場施工

4. 1. 初の冷却式 LPG 船

日本石油(株)では LPG の需要増加に対応してサウジ・アラビアから大量に輸送するため、米国カルテックス社の技術を導入した専用船を建造する計画を立て、米国の戦時標準船 T2 型タンカーを改造すべく日立造船に発注された。

約 2 万 DWT の三島型タンカーの船首尾部を再使用し、新造の船中央部には、2 枚の縦隔壁の内側中央船倉の内 3 区画に防熱を施した LPG タンク合計 9288m³ (プロパンベース 100%FULL) を据え、残りの中央船倉と側船倉を原油タンクとした配置である。

積荷はプロパン、ブタンであるが何れも粗製液化ガスで、プロピレン (C₃H₆)・ブチレン等の不純物を含んでおり、蒸気圧は純粋のものより若干高い。このため、再液化装置の設計条件はエタン (C₂H₆) 2%とプロパン 98%との混合物として設定されたが、これは計算のための成分比で、現実のガスとは異なることである。LPG 貨物タンクの設計温度は約-45℃となり、タンクの構造材には低温脆性の点から 2.5%ニッケル鋼が選ばれた。

本船の場合、LPG の積載、再液化に関する部分の基本計画はすべてカルテックス社の技術により安全の上にも安全にとの基本思想下に行われ、設計や購入品の選択についての変更はなかなか許されない。輸入品の納期管理で苦勞し、品質的な問題もあったが、これらの経験は次船で国産化を推進する強い原動力になったと思う。カルテックス社との技術打ち合わせは岡本が担当した。

4. 2. LPG 再液化装置

タンクへの入熱で蒸発したガスを冷却液化してタンクへ戻す再液化装置は、R12 を冷媒とするターボ圧縮機を使用した間接冷却方式である。入熱で生じた LPG ガスは船尾に置いた冷凍機の蒸発器に相当する LPG クーラーで凝縮され、レシーバからコンデンサイトポンプでタンクに戻される。

このポンプには 3. 2 節で前述した押込圧が必要で、LPG クーラーから下流の配管は液の流れに特に注意して、下りの一方勾配を続けなければならない。冷凍機室の出口にあるシルハイトをかわずのために持ち上げた配管は流れを止めてしまった。

4. 3. 物性線図の作成

1959 年 (S34) 頃から LPG 船の見積が入り始めた。

圧縮機などの計算をするのに、プロパンの物性線図が不十分なことに気が付いた。縦軸が圧力 (logP) 横軸がエンタルピ (i) の、冷凍機の計算ではお馴染みの通称モリエル線図であるが、当時入手した線図ではガスの比容積線 (v) が入ってお

らず、計算ができない。石油化学が専門の某先生にもご相談したが、お手元には見当たらないとのこと。化工機設計課で尋ねると「線図は無いがペリーに数字があるのでは」と教わった。会社の図書室で J.H.Perry 著 *Chemical Engineers' Hand Book*³⁾ という分厚い本が見つかり、プロパンの物性表も出ていたが、BTU (英国熱量単位) である。メートルに換算するには補間など面倒な作業が必要であるが、なにしろ加減算はソロバン、乗除は計算尺とタイガー計算器の時代、「いっそ計算を BTU でやるか」と A1 のセミログ紙を引くことから始めた。物性表の数値は必要なメッシュよりかなり粗いものであったから、BTU のままでもやはり補間が必要となり、3 週間程かけてようやく描き上げた。この線図は後々役立ったが、悠長な仕事をよく許して頂いたことと、上司の方々の太っ腹に感謝している。

その後種々の化学物質について専用運搬船の引き合いを受けたが、基本計画時に密度・蒸気圧力・エンタルピ・蒸発潜熱等々積荷に関する種々の物性が必要となるので、上述のペリーを始め色々の文献からデータを求め、線図に引いて使用した。

後日談であるが、図書室の蔵書に "Petroleum Refiner" という雑誌があり、1958 年 1 月号から 1961 年 1 月号までの長期間に亘って W.C.Edmister 著 *Applied Hydrocarbon Thermodynamics*⁴⁾ という解説が連載されていた。探していたプロパンのモリエル線図も A4 弱と小さいながら 1958 年 6 月号に掲載されている。作図までした時には見つかりなかった雑誌である。記憶が定かではないが、バックナンバーを取り寄せたような気もする。モリエル線図の掲載時期は桂の作図より若干早く、もっと早く見つけておれば苦勞せずに済んだものをと悔やまれた、もっともエンタルピの目盛精度は 4 分の 1 弱と低く、圧力範囲も 15psia (1.05kg/cm²a) 以上となっており、使い勝手は少々不便のようであるが、図表やデータ類を豊富に揃え、モリエル線図はパラフィン系炭化水素の他にエチレン (C₂H₄)、プロピレンと代表的なオレフィン系もあり、実用上ほぼ完備している。私どもが見ても石油精製計算に必要な範囲を網羅し、実務にそのまま使えるように思われた。単位は勿論 BTU 系である。多成分系混合ガスの気液平衡・飽和蒸気圧計算に必要な平衡恒数 (Equilibrium Constants) など、有り難く使わせて貰った。

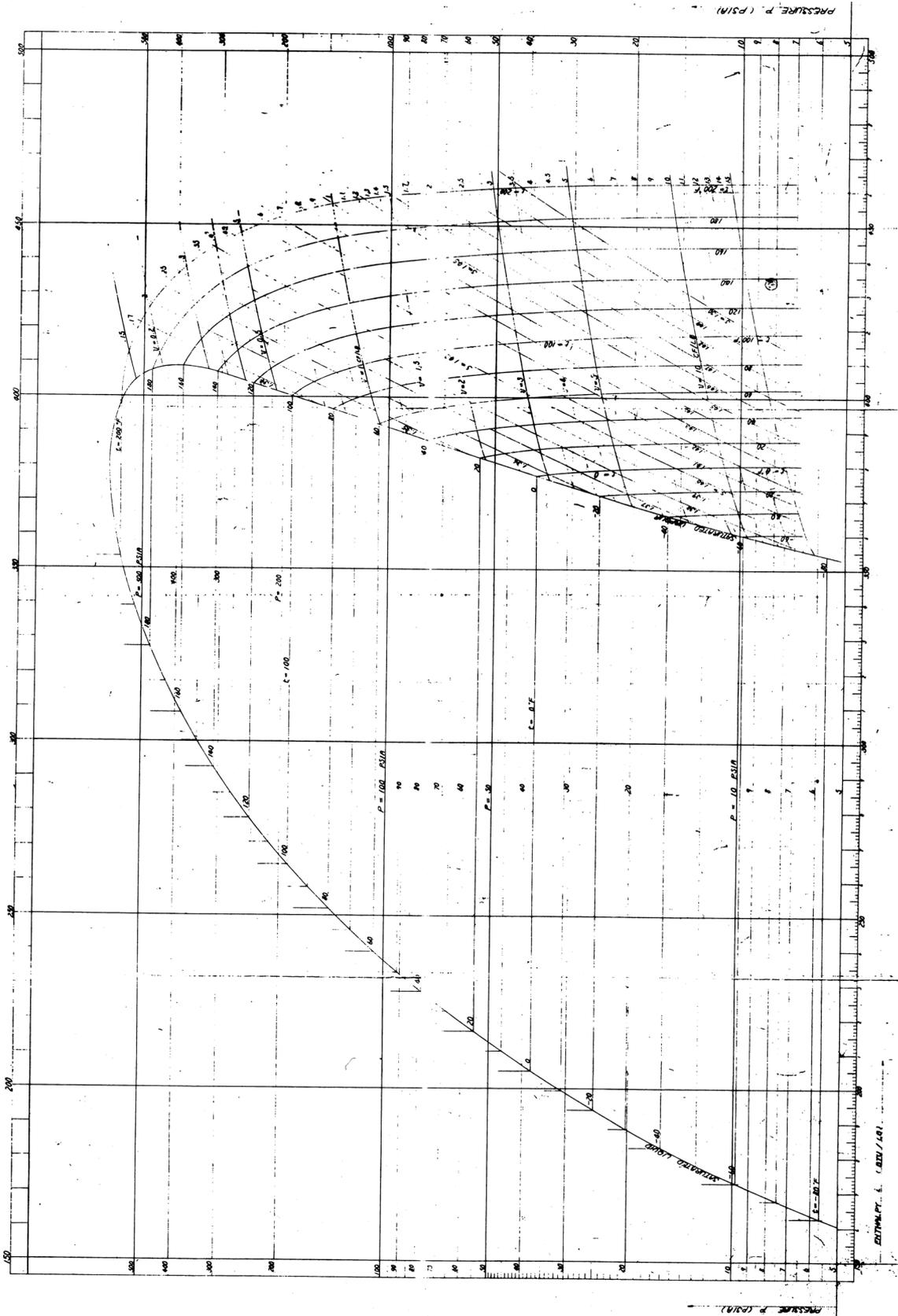


Figure 1 : Pressure-Enthalpy Diagram of Propane

4. 4. 荷役用の配管

荷役のためのポンプは船尾機関室前方のポンプ室に置き、LPGの配管は二重底とLPGタンクの間をポンプ室まで導いた。300mm～400mm径の3.5%ニッケル鋼管、継ぎ目はすべて溶接であり、伸縮継手も許されないので、温度変化や船体変形に対応する伸縮は管路を大きく曲げ、U字形のエキスパンション・ベンドとして吸収させた。天井が低く、タンクサポートの支柱が林立する狭い空間のことである。桂と同期入社の方友篠田和彦氏（因島工場設計部）が計算も配管設計も実に見事に成し遂げられたのには敬服した。

この方式は現在の規則では認められないが、実船では、衝突事故に遭遇した後述の第拾雄洋丸を含め、そのための問題は特に生じていない。

4. 5. LPGコントロールルーム

特筆すべきこととして、LPGに関する操作には大幅に遠隔集中制御が取り入れられた。

船尾のLPGコントロールルームには、部屋の前面を占める大コンソールと周囲の壁面を使って、LPGタンク毎に圧力、液面、温度を指示し、冷凍機、コンデンサイトポンプなど再液化装置の制御と運転状況の指示、LPG荷役ポンプの運転状況指示、LPGタンク付吸引／吐出弁の制御等の機能が備えられていた。普通の商船では機器類はすべて設置場所で手動操作されるのが当たり前、通常はエンジンコントロール室も無かった時代である。始めて扱う大量の制御用電線の束に現場は随分苦労したようで、誤作動のシラミツブシは出航直前まで行われていた。勿論カルテックスの思想によるものであったが、将来の船舶はすべて集中／自動操作になるとの思いに目覚め、以後はLPGコントロールルームを設けることが標準となった。

4. 6. タンクの防熱（硬質ポリウレタン現場発泡工法の開発）

LPGタンクの防熱材に独立気泡硬質ポリウレタンの現場発泡が採用されることになり、本船建造に先だってその工法の開発が行われた。

4. 6. 1. 「硬質ポリウレタン現場発泡」のメリット

当時ポリウレタンは連続気泡による軟質材料がクッション用として工場生産を始められたばかりで、独立気泡による、それも現場発泡は一部糧食冷蔵庫に試用された程度であり、大型低温LPGタ

ンクへの適用は造船史上初めての試みであった。

硬質ポリウレタンは100%近い独立気泡で構成され、比重・熱伝導率が在来型防熱材に比べて極端に低く、独立タンクを収納する狭隘なヴォイド・スペースにおける現場発泡は作業性から見て極めて望ましいので、理想的な防熱法と考えられた。

問題点は実績、経験が皆無という事実を背景に

イ) 安定した性状を保つ製品密度の把握

ロ) 低温タンク用防熱材として必要な物性の確認（物理的・熱的特性、接着強度、難燃性など）

ハ) タンク底部・側部・頂部等使用区域に応じた発泡区画サイズの選定

ニ) 発泡に関するハード、配管システムの試作実験及び管理マニュアルの設定

といった基本的テーマをビーカークテストの段階からステップ毎に確認し、小型・中型モデルを経て最終的には造船所現場で大型モデルにより確認することとなる。

併行して、外装材の選定、防熱ブロックの継目構造の設計、底部サポートや浮上防止装置・ドーム周辺の構造など、課題は山積していた。

4. 6. 2. 開発体制

1958年（S33）有名な「メタンパイオニア」が竣工し、翌年液化天然ガスの試験輸送が成功裡に行われた。引き続き英仏では本格的なLNG輸送船の開発研究が活発に開始され、「メタンプリンセス」や「ジュールベルヌ」の完成へと展開して行くことになるが、これに刺激を受けて、わが国の海運・造船界でもLNGの海上輸送に対する関心が徐々に高まりつつあった。

日立造船でも全社的なLNG開発委員会が発足し、営業・技術研究所・設計および工場の幹部で基本方針が検討され、計画・構造・艙装・機関の各分科会が構成された。「冷却式LPG運搬船」もその一貫として取り上げられ、「硬質ポリウレタンの現場発泡」は艙装分科会の重点課題として推進されたと記憶する。

最近LPG船の防熱は殆ど専門業者に「丸投げ」発注されるようであるが、当時は素材メーカー、施工業者とも技術力が不十分で、実績上も依るべきものはなく、我々と共同研究の形で積み上げて行くほかはなかった。勿論、業者としてもこのケ

ースで成功すれば、LPG 貯蔵タンクの防熱工事で将来が約束されることでもあり、積極的に人と機材を提供して頂いたことは感謝に耐えない。

4. 6. 3. 開発初期の苦労話

今から思えば、初期の研究段階は我々も業者も一言でいえば「やみくもに突っ走った」状態で、正に薄氷を踏む思い、最初のクールダウンで一大音響とともに防熱材が剥離するのではという強迫観念に胸を締め付けられたことを今も思い出す。失敗の積み重ね、それが成功への道であった。

イ) 亀の甲への挑戦

ポリウレタンはポリオール (P) とジ・イソシアネート (R) を主材に発泡材や難燃性添加材が混入される。2液混合といってもやたらと混ぜる訳にはいかない。我々造船屋にとってはまことに取っつき難い代物である。やみくもに有機化学の第一歩に踏み込んで基礎勉強を始めたズブの素人に、メーカーの技術者が根気よく解説してくれたのが記憶に残っている。後日 LPG の蒸発ガス組成の計算でスッと本質的なものに直面できたのは、この経験が背景にあったのかも知れない。

ロ) 形状効果

前述のようにビーカーテストに始まり、メーカーとの共同実験の場で型枠発泡を行ったが、発泡の不均一に起因する密度の偏りに悩まされた。発泡装置の不調もあったが、P・R 混合比率の均一性、混合後注入のタイミング等により部分的な発泡不良が発生した。発泡機構の整備、型枠サイズの適正化、発泡技術の習熟蓄積により改良されていったが、現場実施時の対象エリアの大きさに対して多少の不安を残すことになった。

ハ) 発泡装置と目詰まり

実船の発泡装置は甲板上に置く P, R および発泡材それぞれのタンク・ポンプそれに定量ユニットからなる装置と、発泡機、ミキシングヘッドとホース配管から構成される。実験では小型のポンプとミキサーで代用するので、混合比の整定や注入量の規制に苦労したが、一度停止するとポンプやミキサーに目詰まりが多発し、実験初期にはそのクリーニングに閉口した記憶が生々しい。

勿論実船では継続発泡時間が長く、目詰まりの心配は少ないと思われたが、それでも作業開始・終了時の点検清掃は作業上の要注意点であった。

二) その他

開発実験と併行して、底・側・頂部の区画毎に 1 ショット対象のブロックサイズ設定とそのブロックに対応する周辺枠防熱材の取付要領、外装材と継目構造の設計、圧縮装置の試作等が行われ、最終的には現場の大型モデルで確認補正される運びとなった。各種作業マニュアルと品質検査基準はそれなりにレベルの高いものを設定したが、現場では相当苦労されたことと思われる。

4. 6. 4. 開発命題の探索実行にもっとエネルギーを!!

最近の現場発泡はフロス法など新しいものが導入され、安定したフォームが期待でき、また信頼性の高い品質・作業基準で丸投げできる施工業者が育っていると聞く。40 年前に最初の泡と格闘した者として今昔の感を新たにするとともに、望外の喜びを感じている。

現在 VLCC やコンテナ船、LPG 船は言うに及ばず LNG 船まで新興造船国に席卷されようとしている。コストダウンのために皮を剥ぎ肉を割き、骨を削っても、わが国固有のコストリッチ性を克服するのは並大抵のことではない。寧ろ非価格競争的なものを創出することが 20 年 30 年後に生命を残す道であると信じたい。

世は IT の最中にある。情報を新聞や客先に求める前に IT で世界中の情報を検索し、命題を探索すべきである。開発は造船所が単独でも共同でも、また業者を呼び込んででも、一時も早く製品化を実現する。大事なのはテーマとスピードである。こうした独自性のある技術や製品こそわが国造船業の生きる道ではなかろうか。関西造船協会が強力にバックアップされることを望むや切である。

4. 7. 乗船

本船の処女(?) 航海の行先はペルシャ湾ラス・タヌラ港である。今後の LPG 船設計の参考にするため、防熱効果、再液化装置の運転状況など、データ収集を行うことになり、野間哲夫氏(因島工場設計部)と桂は往復 40 日間の乗組を命ぜられた。当時旅券の取得は容易でなく船員手帳になり、その資格は員外機関士であった。

本船は引渡後川崎市大師河原の日石ガス岸壁で LPG 実ガス(プロパン)を使った予冷と再液化装置の作動試験を行ったが、使用した LPG は再液化を続けながらラス・タヌラまで持って行ったので、

本船の初仕事は「日本からサウジアラビアへのLPGの輸出」となった。

本船の主機は「ターボ・エレクトリック方式」といい、ターボ発電機で低速のモーターを回す方式で、航海速度は12ノットと遅く、本来余り速くない筈のタンカーが本船の横をスイスイと追い抜いて行くのは口惜しかった。

中央船倉に据えられたLPGタンクの外側には防熱が施工され、空間は「ヴォイド・スペース」になっていたが、1日数回垂直梯子を上下して温度の計測やタンクの変位をチェックするのが日課である。この区画に窒素ガスを満たす、いわゆるイナーテイングは当時まだ行われていなかった。

ラス・タヌラに到着して積荷が始められ、順調に積荷が終わるとすぐに出航となった。現地のエージェントは「今まで来た日本の船は長い間いたのに、お前たちはなぜこんなにすぐ出て行くのか？」と訝しげ。往路20日復路20日かけて現地滞在はたった2日。上陸が許され、砂漠の中を車で10分程走ると、小さい村落の中に土産屋があった。パーカーのボールペンが立派な土産になった時代のこと、最高の土産になるとかねて教えられていたゴルフボールは真っ赤なものしかない。半ダース買って帰り部長に恐る々々差し出したが、日本では入手できない珍しいものだと思いで頂き、ほっとした思い出がある。砂漠で白球が使えないことに気付いてはいなかった。

船上では甲板・機関とも3チームに分かれ、1日2回の4時間ワッチである。できるだけワッチに付き合い、いろいろの話を聞くようにした。ワッチが終わり次のワッチまでの8時間はみんなそれぞれの過ごし方で楽しんでいる。船員と仲良くなるにつれ、それまで乗組員の生の声を聞くことが少なく「作る立場」でしか見ていなかったとの反省が次第に強くなり、「使う立場」で考えるべきだと思ふようになった。問題点は即次船の設計に反映できたが、何よりの収穫は設計者としての貴重な開眼機会を与えて頂いたことと感謝している。

5. 冷却式LPG・原油混載船 豊洲丸

東京液化ガス輸送船(株) (三菱商事(株)・飯野海運(株)・東京ガス(株)のJV) ご発注 16660 総トン改造船 1963年(S38) 10月完工引渡 因島工場施工

日石丸の建造中から同型船の商談が進められて

いたが、LPGタンクは4タンクで合計容積13145m³(プロパンベース100%FULL)に増えた。

先般の乗船経験から改良点を選び、本船の設計に反映させるべく、たまたまニューヨークにいた桂は、カルテックスと再液化・荷役などLPG回りに関する打ち合わせを行うよう指示された。

交渉相手のニルセン氏は改良提案に耳を傾けては呉れたが、米国製品を日本製に替えたいと言うと、フォルクスワーゲンの絵を描く。「なぜこの絵を描くのか」というと、自分は毎日フォルクスワーゲンに乗っているが、安全性信頼性が実績上立証されているからだ」と。それでもかなりの提案が受け入れられ、機器類の国産化が実現した。

気になっていたのが再液化装置で、R12冷凍機の性能である。圧縮機、LPGクーラなど冷凍装置一式は米国製であるが、航海中ときに機嫌が悪いくることがあった。設計条件通りの2成分系として計算してみると、LPGの凝縮が始まる"DEW POINT"では問題ないが、完全に凝縮が終わる"BUBBLE POINT"まで考えると、LPGクーラでのR12の蒸発温度が少し高いように思われた。実ガスは設計条件よりかなり甘いものであったから前船では特に問題とならなかったが、2隻目ともなればはっきりさせたいと、設計条件を見直して貰うこととした。実ガスをベースにシビアサイドに見たモデルが決まったが、今度はエタン・プロパン・プロピレン・ノルマルブタンの4成分系である。BUBBLE POINTに見合う蒸発温度を設定して冷凍機にこれを守らせた。ちなみに、DEW POINTが-42.8℃、BUBBLE POINTは-53.4℃である。川崎での予冷は前船以上に順調に行われ、運航実績上も使いやすくなったと評価して頂けた由。

今回は客先の中に三菱商事が入っておられるので、輸入品の扱いをお願いしたところ、テレックスの往復など実に丁寧なフォローで、納期管理も的確に行われたのは大層有り難いことであった。聞くところによると、「輸入品の扱いで造船所に絶対に迷惑を掛けるな」との厳命が下っていたとのこと。注文主でもある同社の意気込みに感謝するとともに、ご配慮がたいへん嬉しかった。

6. 冷却式LPG・原油混載船 第拾雄洋丸

森田汽船(株) (現雄洋海運(株)) ご発注 43724 総トン新造船 1965年(S40) 8月起工/1966年(S41) 7月引渡 因島工場建造

6. 1. 初の新造冷却式 LPG 船

日立造船では初めての新造冷却式 LPG 船である。前船と比べて船型はかなり大きくなったが、原油や LPG のタンクは豊洲丸と同じような考え方で配置されている。すなわち、2 枚の縦隔壁の内側中央船倉に防熱を施した LPG タンクを据え、外側の側船倉を原油タンクとした配置である。LPG タンクは 4 タンクの合計容積 47424m³（プロパンベース 100%FULL）と豊洲丸の 3 倍以上となった。また、国内メーカーの技術力が向上しており、LPG 回りの機器類には殆ど国産品を採用することができた。

6. 2. 衝突事故

大変残念なことであるが、本船は 1974 年（S49）11 月東京湾において衝突事故に遭遇した。サイドタンクに搭載されていたナフサが漏洩引火したため、両船の乗組員多数の死亡事故を惹起する大事故となり、さらに LPG にも引火して燃え続けた。

航路の安全を確保するため本船を沈めることになり、自衛隊の手で砲撃・爆撃・雷撃が行われたが、命中弾を受けても一向に沈まず、2 日間に亘る攻撃後とうとう沈んだが、毎日新聞の見出しには「強すぎた日本タンカー」と書かれた。費用しめて 2 億円という。たまたま桂が工場へ転勤する送別会場の待合室でニュースが放映されたが、まるで鬨り殺しの姿に例えようもない悲しい気持ちで送別会に出席したことを今でも憶えている。後日 NK に挨拶に行った折、成毛竹夫氏が「大変なことでしたね。第拾雄洋丸と聞いて貴方を思い出しましたよ。」と慰めて下さった。

惨事を招いた原因の一つがサイドタンクにナフサを積んでいたためとされ、事故を機にこの方式の LPG/油混載船が禁止されたのには疑問が残った。原油タンカーについても衝突で外板に穴が明ければ積荷は噴出引火するであろうから、同様の問題が生じ得る訳で、危険性はほぼ同じである。原油タンカーもサイドをダブルハルにするのなら分かるがとっていたところ、その後、新造タンカーは小型船以外、サイドも含めてダブルハルが要求されることになって、少し気が晴れた。

7. 常温式アセトアルデヒド運搬船 第二チッソ丸

新和海運(株)ご発注 505 総トン新造船 1964 年（S39）8 月起工/同年 12 月引渡 神奈川工場建造

前年に建造した加圧式塩ビモノマー運搬船チッソ丸が荷主チッソ社にご好評を頂き、引き続いて本船を建造することになった。

アセトアルデヒド（CH₃CHO）は沸点が 20.2℃と常温では液体とガスの境目である。NK 規則で調べてみると、38℃で 2kg/cm² 以上の貨物が液化ガスとして取扱われる。この温度では 0.9kg/cm² と規制値以下であり、運輸省が規定している「危険物船舶運送及び貯蔵規則」にも格別の規程がないので NK に確認すると、可燃性液体に間違いのないとのこと。貨物タンクは鏡板付円筒形の一見圧力タンク風になった。荷役で空気の侵入を防ぐためベーパー均圧管を設け、貨物取出管は後部のポンプ室まで、タンクを据え付けた船倉内に導設した。

このようにして本船は問題なく就航したが、7 年後程経って IMCO（現 IMO、国際海事機関）で Gas Carrier Code（現 Gas Code）を制定することになり、日本代表として三井造船から大島正直氏が参加され、そのバックアップの委員会（造研の RR3 と記憶する）に桂も参加した。そこでは、対象物質の定義を「37.8℃ で絶対圧 2.8kg/cm²（ゲージ圧 1.8kg/cm² に相当、筆者注）を超える液化ガス」としながら、アセトアルデヒドを液化ガスとする原案が示された。これは規則として相矛盾することになるので、液化ガスから除外するように交渉をお願いしたが、大島氏のご尽力の甲斐もなく、結果として「及び本コードに示す物質」と追記までして液化ガスに含められてしまった。どうして液化ガス並みに扱うべきなのか理解できず、いまだに釈然としない。

8. 中温中圧式液化アンモニア運搬船 国周丸

国華産業(株)ご発注 1226 総トン 新造船 1964 年（S39）8 月起工/同年 11 月引渡 桜島工場建造

今回は生産工場の出荷状態と消費工場の荷受状態がどちらも同じ中温中圧、すなわち冷却と加圧の併用状態が望ましいということになった。設計条件は -5℃ min, 7kg/cm² max が選ばれたと記憶するが、問題は充填限度である。

この温度・圧力条件では液体アンモニアの比重は常温の場合より 10%余大きい。前述の「危険物船舶運送及び貯蔵規則」によれば、「アンモニアタンクに充填する液体アンモニアの重量（kg）＝タンクの内容量（lit）/1.86 以下」と定められ、温度による比重の違いが考慮されないものである。

すなわち、このままでは常温の場合と比べて貨物液の占め得る体積が小さく、ベーパーゾーンの占める割合が大きい低効率の船になってしまう。

客先から要望を受け、運輸省船舶局の検査測度課に出向いた。あらかじめ設計の東京駐在員から根回しされていたからであろうか、担当者の対応は大層好意的で、説明を聞き終わるや即座に「分かりました。こういう形式の船に不利にならないよう規則を改正し、官報に掲載します。」と言われ、当方が提案した温度・密度に基づく充填限度を認めて頂いたのには感激した。

公示されたのは本船引渡前40日の10月16日であったが、即日実施の省令として「ただし、海運局長が液体アンモニアを冷却する装置及びアンモニアタンクの防熱装置の能力を考慮してさしつかえないと認める場合は、この限りでない。」との官報を見たときは「自分がお願いに行き規則を変えて貰った」と誇らしく思ったのを覚えている。

現行の規則では、対象を特定しない一般液化ガスについて、液体貨物の体積をタンク内容積の98%とし、これを基準温度での比重と積込時の圧力・温度での比重との比率で修正するような、普遍的かつ具体的な計算式に改められている。

この船も荷役は中間タンク方式であった。アンモニアガスは冷凍機の冷媒として古くから使われており、当時船用としてはフロンガス冷凍機(R12からR22への過渡期)が一般的であったが、冷凍工船など大型冷凍設備ではアンモニアも使われていた。本船の場合、圧縮機は貨物自身の保冷用と揚荷用の二役に使われた訳である。

9. 終わりに

ケミカル・液化ガス運搬船の揺籃期について、思い出すままに追憶を記した。

日立造船のケミカル・ガス運搬船は広く海運界から高い評価を受け、関係会社を含め70隻以上の多数が建造されて日立造船グループの大きい看板船種に育った。特に冷却式LPGタンカーは当時世界最大船型のESSO FUJIなど15隻が建造され、いずれもご好評頂いている。

また、LPG船の建造で立証された卓越した建造技術は注文主の評価、信頼を得て、後続のLPG船やタンカーなどの商談に結びついている。例えばエッソ社(現エクソン社)はその後数年間で22千DWトン型9隻をはじめとして280千DWトン型、

400千DWトン型、500千DWトン型のタンカー合計17隻、3000千DWトン以上の建造に結びついた。12年振りのご注文である。ブームの時期にも恵まれはしたが、LPG船の建造がきっかけになったものである。優れた技術が新しい商談を呼び込んだ理想的な姿と言えよう。

このLPG船商談は偶然のチャンスをすかさず注文に結び付けた営業陣の機転と努力の成果でもあった。エッソ社プレストン氏とテイラー氏はLPG船を注文すべく来日し、大手造船所を歴訪されたが、折しもタンカーブームで、豊富な手持ちの上以前同社が日本でタンカーを建造したとき、自社の仕様書(いわゆるエッソスペック)で契約し、厳しい監督をしたとして各社が敬遠したため、商談が成立せず、帰国前夜、ご一行が銀座で憔悴と飲んでおられたのを丸山雅夫輸出船営業部長(当時)が偶然見かけ、「日立造船スペックで造るなら」と持ちかけたのが発端と聞く。

一方、冒頭BTX運搬船で述べた亀の甲の恩恵は桂が関係会社の東洋運搬機(株)(現TCM)へ移ってから続いた。ゴルフ場でたまたま一緒させて頂いたお客様にフォークリフトをお願いに上ったが、応接室にケミカルタンカーのモデルがあった。船もお願いしたところ、折からご商談中の造船所が倒産するハプニングで、関係会社の日立造船向島マリン(株)にケミカルタンカーを連続してご注文頂き、TCMともども日立造船グループを大層ご愛顧下さるといふ、信じられないような幸運に結びついた。これも1番機・1番船の出来映えを評価されてのことと伺った。近畿輸送倉庫(株)石橋亘社長との素晴らしい出会い、亀の甲は昔を忘れてはいなかったのである。

高い技術力は未経験の目標に挑戦し、成功させることによって創られ磨かれる。そしてまた次の挑戦への原動力になる。経験に頼ることの多い造船技術において、ガス船の設計建造は理論的アプローチに始まり、広い分野にまたがる学問の裏付けの下に一步一步進めて行くべきものとして貴重な機会を与えて呉れた。

10. 感謝の言葉

開発に当たっては、荷主、船主、運輸省、船級協会、大学と多くの方々にご指導・ご支援頂き、日本造船学会の造船設計委員会では先生方始め同業各社の方々にもご指導頂いた。また、社内においては上司、同僚はじめ技術研究所、工場、営業

など関係先の人々にご指導・ご協力頂いた。

さらに、造船部門を離れて時間が経ち、すべての職務から退いたため資料を整理してしまい、記憶も薄れた現在、拙文をしたためるに際して友人知人の方々に色々と調査をお願いした。

ここに紙面をお借りし、あらためて皆様方に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 造船設計委員会 P53 小委員会, "報告「加圧型 LPG 船におけるタンク内凝縮量の推定」" 日本造船学会誌第 591 号 (1978 年 (S53) 9 月)
- 2) 桂豊, 我孫子玲一郎, 坂本武, 岡本昌治, "解説「低温液化ガスタンクの圧力上昇について」", 日本造船学会誌第 605 号 (1979 年 (S54) 11 月)
- 3) J.H.Perry, "Chemical Engineers' Hand Book", McGraw-Hill 3rd Ed., 1950
- 4) W.C.Edmister, "Applied Hydrocarbon Thermodynamics", Petroleum Refiner, Jan.1958~Jan.1961

著者プロフィール

岡本 富保

1926 年生
京都府出身
最終学歴：
東京大学工学部船舶工学科
1948 年 日立造船(株)入社
1978 年 有明工場設計部長
1982 年 船舶本部
開発設計部長
1984 年 船舶本部副本部長
1986 年 関西設計(株)取締役社長
1988 年 同社 退職



著者プロフィール

桂 豊

1931 年生
大阪府出身
最終学歴：
大阪大学工学部造船学科
1954 年 日立造船(株)入社
1983 年 船舶本部
造船基本設計部長
1986 年 船舶本部副本部長
1988 年 関西設計(株)取締役社長
1991 年 日立造船(株)取締役事業開発本部長
1993 年 東洋運搬機(株)常勤監査役
1996 年 常勤顧問
1997 年 同社 退職

