(昭和 48 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

制限喫水における超大型船の最適船型の決定

正員 佐 藤 茂* 正員 中 村 一 郎*
 正員 加 納 正 義** 正員 植 竹 信 次 郎*
 正員 久 富 吉 弘*

On the Study of Optimal Design of ULCC under Restricted Draught

by Shigeru Sato, *Member* Ichiro Nakamura, *Member*
 Masayoshi Kano, *Member* Shinjiro Uetake, *Member*
 Yoshihiro Kudomi, *Member*

Summary

The pursuit of economy has resulted in the large tankers so-called VLCC or ULCC. Deeper draught is, of course, advantageous for the purpose of increasing the tanker size, but naturally it is not unlimited.

In this paper, authors tried to survey through the simulation technique for the optimal dimensions of ULCC with respect to building cost under restricted draught which can stand against the conventional tankers free from draught restriction. Consequently, it was found that lower L/B makes building cost cheaper and that severer draught restriction makes this tendency notable.

Reflecting the study, authors have developed the new design of 400,000 dwt ULCC with L/B as low as 5 and with restricted draught of 22.15 meters. And to materialize the design, authors have made extensive feasibility study regarding controllability, propulsion and structure for hull using many sizes of models including large model of 30 meters length.

As a result, authors have convinced themselves that the large wide beam tankers of which L/B is as low as 5 can be realized.

1 緒 言

経済性の追求から、タンカーの大形化はますます進み、いわゆる VLCC (Very Large Crude Carrier) とか ULCC (Ultra Large Crude Carrier) と称せられる超大型タンカーが建造ないし就航しつつある。これらの船の経済性には、就航する航路、港湾の水深が大きな影響を持ち、その結果として次の2つのタイプの輸送方式が考えられる。すなわち1つは水深が十分ある所に C. T. S. を設けて、喫水に制限のない船による OFF SHORE TRADER (O. T.) 方式と、浅い水深に応じた喫水 (制限喫水) の船により直接荷揚する DIRECT TRADER (D. T.) 方式とである。

O. T. と D. T. との優劣比較は、船価のみならず、輸送システム全体を検討すべきで、簡単には判断できない。今、従来通りの輸送方式が可能であるという点から、D. T. が有利であるという意見にもとづき、制限喫水のもとでの船舶の経済性を検討する。船舶の経済性は様々の要素で構成されており、またその解釈にもいろいろな方法がある。従って一般的に最適船型を求める手段は数種の方法があり、更に諸要素の影響度をどのように入れるかなど非常にむづかしい問題であるが、大型化する程採算に及ぼす船価の影響が強くなるということから、単位載貨重量当りの建造船価に焦点を絞って、検討を行なうことにした。

すなわち、大型船の建造船価は船型によって大きく左右されるので、制限された喫水のもとでの単位載貨重量

* 日立造船(株)船舶事業本部

** 日立造船(株)舞鶴工場

当りの建造船価が、喫水に制限のない場合の船型の船価と十分競合し得る値を保ちながら、船型の大型化をはかる場合、どのような船型が適切であるかその傾向を見出すと共に、その船型を実船として成立させるための検討を行なった。

2 喫水約 22 m の最適船型の計算

原油の輸送ルートの中で重要なルートの1つであるペルシャ湾と欧州ルートでは、欧州側の揚地としてオランダのロッテルダム港が重要な基地となっている。ロッテルダム港は将来 72 フィート (21.95 m) の喫水の船まで出入港できるといわれており、一応この値をこのルートの制限喫水と考え、この喫水を持つタンカーの最適船型を求めてみる。このための計算のフローチャートを Fig. 1 に示す。まずこれについてその概略を説明する。今、船型要素として、

L : 垂線間長,

B : 幅

D : 深さ

d : 喫水

C_b : 方形肥せ係数

Fig. 1 Flow chart

Fig. 2 Typical tank arrangement

の5個を選ぶ。この5個の船型要素を定めるために、載貨重量 (DW)、喫水 (d)、速力 (V_s) を与えた場合、ある与えられた喫水における、2つの条件 (DW , V_s) に対して4個の未知数 (L, B, D, C_b) がある事になり、条件を満たす船型要素は無限にあることになる。従って、これ等船型要素の範囲を適当に限定し、その組合せに対し、その中で建造船価係数 (BCF) (単位載貨重量当りの建造船価を示す指数) が最小になる船型を見出せばよい。或る速力下で、喫水を一定として載貨重量を変化していけば、最終的には制限された一定の喫水のもとでの BCF が最小の載貨重量と船型が定まる。

船体抵抗は Schoenherr の friction line をベースとする3次元外挿法によっている。形状影響係数は、過去の水槽試験成績を整理してチャート化して使用している。また自航要素については、模型試験および試験運転成績をもとに指数解析をした須藤の式^{1,2)}を用いた。ただしプロペラ効率比 (η_r) $\times$ 伝達効率 (η_t)=1としている。プロペラ性能は、指定されたプロペラ翼数、展開面積比、主機回転数により MAU, AU チャート上の最適効率の線上でもとめている。後で述べるように本論では、幅広船型が対象となり、 $L/B=5$ あたりのデータが重要になって来るが、この附近のデータは数が少く信憑性に若干の懸念はあった。しかし本論で決定した $L/B=5$ の船型に対して行なった水槽試験成績からみて、ほぼ妥当な値を示しているの、この計算方法でほぼ大差ない結果が得られるものと考えている。

貨物油艙配置は、まず主機馬力、線図、などの関連から機関室長さを決め、与えられた l_{cb} において、満載状態で、積付けおよび良好なトリム性能を確保できるよう貨物油艙長さを決めた。 l_{cb} は基本的には抵抗推進性能上から与えられるものであるが、トリム性能

とのかねあいもあること、 l_{cb} の最適位置は速力、船型で変化し、およそその傾向はわかっているが³⁾、厳密には与え難いことなどを考慮して、標準としては、大型肥大船を対象として $-3.0\% L_{pp}$ とし、必要に応じて任意の l_{cb} もインプットできるようにしている。

IMCO のタンク容量制限によると、同一タンク長さの配置を考えれば、1 across tank の最大容量は決まってしまう。例えば Fig. 2 の例では、載貨重量約 40 万トン以下のときは、 $2L-2W$ 、 $3L-2W$ それぞれ $90,000\text{m}^3$ および $120,000\text{m}^3$ である。またこのとき縦通隔壁間隔はそれぞれ $B/3$ 、 $B/4$ となる。従って貨物油艙長さからタンクの最小個数が求まり、油密横隔壁、制水隔壁の数が決まる。 $0.3L\text{ fwd}$ の stranding に対するタンク配置は、統一的な取扱いが複雑となり、又最適船型摘出の際の船型群の比較には 2 次的影響と考えて考慮していない。

船殻重量は建造船価に及ぼす影響が大きい。縦部材の重量は船級協会ルールの要求最小断面係数による重量と局部強度による重量とを算出し、その大きい方をとっている。勿論高張力鋼を用いる場合そのための重量軽減量が求められるようになっている。

縦強度計算は、まず専用バラストタンクなしで計算し、静水中曲げモーメントが船級協会が規定している最小断面係数に対する許容値以下におさまるかどうかを判定する。もしおさまっていない場合は、貨物油艙タンクの重心を中心として、前後にある長さの専用バラストタンクを配置し、縦強度を満足するまで専用バラストタンクの長さを長くしている。

さて以上述べたごとき方法で、載貨重量にかかわらず与えられる条件を次の通りとした。

喫水 : 22.15m
 航海速力 : 15 knots
 主機、推進器軸 : タービン 1 基、1 軸
 航続距離 : 11,000 sea miles (P.G.~N. Europe)

喫水 22.15m というのは、ペルシャ湾と北ヨーロッパ間の燃料消費等を考慮して、北ヨーロッパ到着時に喫

D.W 400,000 L.T.
 DRAFT 22.15 M
 Vs 15.0 KNOTS

Fig. 3 Building cost factor (BCF) and Ship dimension factors (400,000 dwt)

D.W. 400000 LT., DRAFT 22.15M, V_s 15.0 KNOTS

Fig. 4 Building cost factor (BCF) and Ship dimention

Fig. 5 Building cost factor (BCF) and deadweight

Fig. 4 と同様の作図をその他の載貨重量に対して行ない、Optimum for constant L/B の曲線上の建造船価係数を、 L/B をパラメーターとして載貨重量ベースに図示すると Fig. 5 のようになる。定量的に見易くするために、この曲面を $C_b, L/B$ 平面に平行な平面で切ったときの切口を等高線として図示したものが Fig. 4 である。この図には深さも併記してあるので、これによって載貨重量 40 万トンを満足する任意の船型 ($L, B, D, C_b, d=22.15\text{ m}$) が求められる。

Fig. 4 と同様の作図をその他の載貨重量に対して行ない、Optimum for constant L/B の曲線上の建造船価係数を、 L/B をパラメーターとして載貨重量ベースに図示すると Fig. 5 のようになる。

Fig. 5 は各 L/B が載貨重量の変化に対してどのような BCF の変化を示すかを実線により図示している。また Fig. 4 から $L/B=4.5$ 附近に BCF 最低の最適船型の唯一のものが求められる。同様な方法でそれぞれの載貨重量について、この船型の L/B を求めると破線の如く図示できる。

この図表から次のことがいえる。

(1) L/B を小さくすることの効果は、喫水、速力一定の場合、載貨重量が小さいときはあまりないが、載貨重量が大きくなって来ると徐々に効いて来る。すなわち制限喫水でその喫水に比して載貨重量が大きい場合 L/B を小さくすることが効果的になって来る。

(2) L/B が一定の場合、それに対応した最適載貨重量が存在する。

このように大型化するほど L/B を小さくすると有効となるということは船殻重量の面から次のように説明できる。すなわち、この場合喫水が一定であるから、深さ (D) もほぼ載貨重量にかかわらず一定である。従って

水が 72 フィートになるように決めたものである。航海速力をいくらに設定するかによって、船型、建造船価にも影響があるわけではあるが、著書等が別に検討した結果⁴⁾によるとタンカーの最適速力は比較的低速で 15 knots を中心に ± 1 knot 附近であり、またこの附近では、多少の速力変化も経済性にあまり影響を与えないようであるので、計算条件としての航海速力は 15 knots で一定とした。

今、船型要素として、 $C_b, L/B, B$ をとり、これ等と建造船価係数との関係を載貨重量 40 万トンの場合について図示すると Fig. 3 のようになる。一定の載貨重量を

DW 400000 LT.
Vs 150 KNOTS

B.C.F.

V/gamma = 60
50
40
30

DRAFT (M)

Fig. 6 には載貨重量 40 万トンについて、喫水を変えた場合の Optimum for constant L/B に対応する BCF を L/B をパラメーターとして表示している。この図でも喫水の深い場合には L/B によってあまり BCF は変化しないが、喫水の浅い所では、 L/B の変化の船価に与える影響が大きくなっている。この理由は上述と同じである。通常的大型タンカーでは $L/B \div 6$ であったが、この場合の最適喫水は 23~24m と算出された。同じ L/B を保ちながら喫水を 22m に制限すると、建造船価はやや上昇する。しかし L/B を小さくすれば、建造船価の上昇を防ぐことができる。

船型シミュレーションによれば、前述した如く、最適船型は L/B に応じて求められ、 L/B が小さいほど有利である。従って L/B の下限が、運動性能上、配置上、構造上などの諸検討から決めることができるならば、最適載貨重量における最適船型が決まる。しかしながら実際問題として、この下限を理論的、実証的に決定することは、現在の著者等の知見からして困難である。しかし Fig. 5 からわかるように、22.15m という制限喫水でかつ航海速力 15 ノットの場合、optimum の船型は 50 万トンクラスであるが、 $L/B=5$ とした場合に最低 BCF を与える 40 万トンクラスとの船価差はそれほど顕著なものでない点、更に著者等は $L/B=5$ までの船についての検討はある程度終っていたことなどから、実船については $L/B=5$ とする事にした。これに相当する実船の主要寸法、タンク配置を Fig. 7 に示す。実船の設計のすべてをシミュレートすることは困難で、例えば舵面積は後述するように水線下側面積の 2.4% 程度必要と判断しているが、このような巨大な舵や、これを支える長大な船尾の張出しは、船尾部盤木強度、Dock の渠底強度上限界に近い。更に船尾部構造の強度、構造、配置等詳細設計でなければ考慮できず、かつ本船の場合建造コストにかなりの影響を与えるものもシミュレーションには考慮されていない。しかし総合的に検討すると、Fig. 6 からわかるように載貨重量を 40 万トンにおさえ $L/B=5$

Fig. 7 400,000 DWT Designed Ship

とした場合、喫水 22m 附近で BCF はほぼ最小になる。

$L/B=5$ は従来の幅広化の傾向からみれば、飛躍的な値であるが、操縦性について、

- (1) 主要寸法比や C_b が大きな要素であるが、船尾線図それ自体が更に重要な問題で、線図が適正ならば L/B が小さくても成立ちうる⁶⁾。(従って C_b は通常の値を採用する)
- (2) 異常不安定モーメントの発生を防止できれば、すなわち不安定である限りは、舵面積を大きくし、かつ適正な自動操舵装置を使用すれば、船の制御は可能である^{7,9)}。

といわれているので、以上の点に留意すれば操縦性について特に問題はないと判断したのであるが、これを検証するため、小型模型から 30m 大型模型に至る各種の模型実験を含む一連の調査研究を行なった。その結果、この船型が実船として実現可能であるという結論を得た¹⁰⁾。

まず第一の重点である線図は、次のような点に留意して作成した。(線図の概略は別論文¹⁰⁾参照) すなわち、幅広船型であるだけに、船体まわりの流れのスムーズさという点を第一に考えた。その主な点は次の通りである。

- (1) 船首は、ビルジ部の半径を大きくとったシリンдриカル・バウとした。水線形状は拋物線状にし、ブリズマティック・カーブを肩落ちとした。
- (2) 船尾は、*buttock flow line* の考えをとり入れた V 型船尾とした。
- (3) *Cruiser stern* を大きくし、船尾剥離の防止にそなえた。
- (4) そのため、プロペラ軸芯をやや下げ、舵はマリナー型とした。

適正な線図を開発するためのシリーズテストなどは行なわなかったが、特に船尾線図に重点を置き、小型模型を用いて、当社技術研究所の回流水槽において、流線観測を行なった。模型が小型でもあり、この試験でもって抵抗自航試験または操縦性試験における不安定現象の存在の有無を予測することは、実験の性質上不可能であるが、観察の限りでは流れに異常はなかった。

抵抗自航試験は日本造船技術センターにて行なったが抵抗係数、自航要素とも従来の船型に比して特に劣ることもなく、先の船型計算に使用した馬力計算と良い一致をみた。しかし実船と模型の相関については、従来通りの経験的データが、幅広船に対してもどこまで通用するかは明確でないので、これ等を確認するために 30m の模型により、抵抗、自航試験を行なった。これ等の結果については更に検討を加えて、できれば次の機会に発表したいと考えている。

操縦性については、4m、10m、30m の 3 種の模型を用いて実験した。舵面積は $2.4\% L \cdot d$ とした。このほかに 10m 模型では、2% および 2.2%、4m 模型では 1.9% に舵面積を減らした場合についても実験を行なった。舵面積を減らした実験では小舵角(左旋回)の逆スパイラル試験時に異常不安定モーメントの発生がみられるが、原型程度の舵面積の場合不安定ループ幅は満載状態で、4m、30m モデルとも 2~3 度以内におさまっている。更にこのような船の実際の操船感覚上の問題点の有無を調査するために、広島大学船舶工学教室の操縦シミュレーターを借用してそのテストを行なった。その結果 30m モデル程度の不安定度ならば操船上何等問題ないことがわかった。また仮に実船が 30m モデルよりかなり不安定度が高くループ幅が 8 度程度になったとしても、シミュレーション結果からみれば、実際操船上特に問題はないと思われる。

オートパイロットによる保針試験においても、yawing 振幅は小さく、周期的異常モーメントも発生していない。仮想外乱をオートパイロットに加えた保針試験においても十分安定した保針性をみせている。これ等操縦性に関する研究は別論文¹⁰⁾に詳述の通りであるが、結論として、原型(舵面積 $2.4\% L \cdot d$) 程度に十分な舵面積を備えるならば、本船は十分実船として成立することが確証された。

次に船殻構造については、貨物油艙部の構造方式について、*center line bhd* を有する 3-l'bhd system を含む 3 方式 (3-l'bhd with 1-stringer, 2-l'bhd with 1-stringer and center girder, 2-l'bhd with 2-stringer without center girder) について、強度的、工作的見地から検討した結果 3-l'bhd system を採用することにした。このため機関室前端で *center line bhd* に不連続が生ずるので、この附近の剪断力についても検討したが、問題はなかった。そのほか、渠中にて建造のため、船尾のクルーザースターン部には巨大な舵、スターンフレームが取付けられ、渠底盤木にかかる荷重も大きくなるので、この点の検討も行ない若干の方策を加えれば問題がないことがわかった。

なお、縦強度を検討の結果、波浪曲げモーメント、剪断力ともに幅広船では従来の通常船型に対するものより

は、相対的に小さくなることが判明した。たとえば、 L を一定にして B を変えていった場合、 $L/B=5$ の船の波浪曲げモーメントは、 $L/B=6$ のものより5%程度小さくなることがわかったが、実船はこれを考慮して寸法を下げてはいない（今後の検討の問題と思う）。

構造上の諸点についての詳細は別論文⁹⁾に述べるが、これ等検討の結果、幅広化に伴う基本的な構造上の問題は解明され、本船は実船として成立するものであることがわかった。

4 結 言

喫水に制限が生じた場合、経済性を損うことなく、タンカーの大型化をはかるためにはどういう船型にすべきかについて調査した。その結果 L/B の小さな幅広船が建造船価からみて、この目的に適ったものであることが判明した。それに従って載貨重量 40 万トンの実船の設計を行なった。 $L/B=5$ の船型は各社それぞれに具体化しつつあるようであるが、いまだ公表されたデータは少い。今回の計算では、 L/B を5以下にすれば更に建造船価が低下するような結果を示しているが、実船の L/B は実際設計面での諸点を考慮のうえ5にとどめた。しかし今後 $L/B=5$ についての諸データが蓄積されてくれば、更に精度のよいシミュレーション計算も可能になるであろう。そしてその実績をふまえて更に L/B の小さい船型の開発の可能性も検討されることになると思われる。経済性の追求はつきることがないが、しかしそれと共に安全で信頼性のある良い船を設計するためには、幅広船の諸性能の研究に一層の努力をしたいと考えている。

結論的にいえば、 $L/B=5$ の船に対しては適当な線図、舵面積があれば、推進性能、運動性能共に従来の船と変わらないという事であり、構造的には、3-l'bhdの採用により特に問題ないといえる。

なお本船型の開発に当っては ESSO 社の協力に謝辞を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 須藤彰一 他：A Consideration of Model-Ship Correlation on wake fraction, 関西造船協会誌 125 号 (昭和 42 年 6 月)。
- 2) 須藤彰一 他：A Consideration of Model-Ship Correlation on wake fraction (Disposition of Wake data-2nd report), 関西造船協会誌 127 号 (昭和 43 年 3 月)。
- 3) たとえば、横尾幸一：巨大船の船型と推進性能との関係, 日本造船学会誌 466 号 (昭和 43 年 4 月)。
- 4) 久富吉弘 他：超大型油槽船船型について, 日立造船社内論文 (昭和 46 年 7 月)。
- 5) 片坐泰治 他：NK 船殻タンカーの船殻重量推定法, 日立造船社内論文 (昭和 45 年 8 月)。
- 6) 野本謙作：肥大船型船尾形状が操縦性に及ぼす影響に関する一実験, 第 29 回試験水槽委員会第 2 部会資料 (1971, 10 月)。
- 7) 元良誠三 他：自動操舵による操縦性能の向上について, 造船協会論文集第 116 号 (昭和 39 年 12 月)。
- 8) 元良誠三 他：異常現象を伴う船の操縦性の一解析, 日本造船学会論文集第 128 号 (昭和 45 年 12 月)。
- 9) 佐藤 茂 他：幅広船の構造強度に関する研究, 48 年度日本造船学会秋季講演会発表
- 10) 佐藤 茂 他：大型模型による幅広船の操縦性に関する研究, 48 年度日本造船学会秋季講演会発表