(昭和 40 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

潜水タンカーの経済性に関する研究

正員 黒田 七郎* 正員 田 中 拓**
正員 上 田 隆 康** 正員 隆 杉 憲 行*

Commercial Feasibility of Submarine Tankers

By Hichiro Kuroda, *Member* Hiraku Tanaka, *Member*
Takayasu Ueda, *Member* Noriyuki Takasugi, *Member*
Summary

It is well known that a submarine has the excellent propulsive performance in high speed navigation in deeply submerged condition, but few papers have sufficiently shown economical feasibility of submarines for commercial use.

The authors have studied about the feasibility of submarine tankers with a view to develop technical problems of commercial submarines. At first, the experiments on five submarine tanker models with the circular and rectangular hull sections were performed by method of three-component measurements at Mejiro No. 2 Tank.

Examining the resistance, stability, floating draft and general arrangement of the submarine tankers, the authors chose the ST-2 type rectangular hull form as best for the submarine tanker. The lines of the ST-2 type hull form was shown in Fig. 3

The ST-2 type submarine tankers with various dead weights and shaft horse powers were designed and their investment, operation cost, annual profit, freight rate per dead weight and capital recovery factor were calculated. The results of this study were summarized in Fig. 19 to 23. The best submarine tanker in the point of view of commercial feasibility was 40,000 tons in dead weight and 20,000 horse powers in shaft horse power under restrained condition within 14 meters in maximum floating draft. On the contrary to the previous opinions, was shown the fact that the submarine tankers would not be very fast than present conventional tankers. As shown in Fig. 23, the submarine tanker would not have commercial feasibility without drastically decreased cost of nuclear power plants.

1 緒 論

1-1 新形式船舶の研究

造船技術史によると、1802 年頃 screw propeller による推進法は、アメリカの Conel Stevens によつて發明されたことが記されているが、以来船舶の姿は原理的にはほとんど変化することなく、今日に承継がれてきた。このような変化にとぼしい船型研究の歴史を、航空機の型式の目覚ましい変化と比較して、現在の船舶の姿が輸送機関として時代遅れなものではないのか、より高能率な輸送の方法があるのではないかといつた議論が最近盛んになつて来ており、一般にこの一群の研究は新形式船舶の研究または将来船の研究と呼ばれている。

新形式船舶の研究は、船速の増加を目標にしているものが多く、このことが、近年の新形式船舶研究の特徴に

原稿受付 昭和 39 年 12 月 20 日

* 川崎重工業株式会社 潜水艦設計部

** 船舶技術研究所 推進性能部

なっている。船速の増加については、一般に知られているように、造波抵抗の急激な増加、波浪中の船体運動の増加、プロペラキャピテーションの発生等が、技術上の重要な障害となつている。このような障害を克服して、船舶を高速化するために、下記に示すような新型式船舶が工夫され、研究がすすめられている⁽¹⁾。

- ・滑走型船舶 — 水中翼船, GEM,
- ・排水型船舶 (水上) — slender ship, 双胴船, waveless hull form ship, 半没水船,
- ・排水型船舶 (水中) — 潜水船

しかしながら商船設計の立場から見ると船速の増加の障害となつているものは、抵抗の増加等の物理的なものではなく、むしろ、これに対応して出力の大きな主機を搭載することによる、建造費の増加、載貨重量の減少等の経済性の劣化にあると考えられる。このような理由から、新型式船舶の研究には、経済性の検討を技術上の研究と並行して行なうことが特に重要になつている。

造船技術と海運経済との間には不可分の関係があり、その内には商船設計の根本にふれる重要な問題があるにもかかわらず、これまで深く研究されていなかった。

しかし近年 Michigan 大学の Benford 教授によつて、船舶の経済性評価に対する基本的な考え方が整い、この分野の研究が進歩した⁽²⁾。Benford は、船舶の速度、大きさ等を含むあらゆる性能上の評価は、経済性の検討によつてのみ正しくおこなうことができるという観点にたち、タンカー⁽³⁾、鉱石運搬船⁽⁴⁾、原子力タンカー⁽⁵⁾等各種の船舶の性能を分析している。このような観点から著者等は、潜水タンカー (原油) が、将来どのような

技術の発達と経済的条件のもとで、実現の可能性があるかを調べ、その結果として潜水タンカーの総合的な見透しを明らかにしたいと考えている。すなわち、最初に港湾の深さ、原子力機関等の現在の技術上の周辺条件を満足するように潜水タンカーの仕様の概要を定めて、試設計をおこない、次に載貨重量を主変数とし、軸馬力をパラメータと考えて、船価を推定し、年間収入、運航費等を算出した。さらに上記のデータより、資本回収率および載貨重量トン当りの運送原価を求めて経済性の解析をおこない、潜水タンカーに最適な船の大きさ、速力、潜航深度等の基本設計要素の概要を求め、各種の問題点を整理した。以上の研究の過程を flow chart にして Fig.1 に示した。

以下に、この研究の成果について説明するが、

Fig.1 潜水タンカーの経済性解析の flow chart

Fig. 2 水上船と潜水船の馬力カーブの比較 (文献 8 より転載)

その前に一つの実例を示して、新型式船舶の研究には、経済性の検討が重要であることを強調したい。例えばこれまでの潜水船の研究では、Fig. 2 に示すような水上船と潜水船との馬力曲線の比較を示し、主機出力上潜水船が有利となる速力 (Fig. 2 では約 21 knot 以上) を潜水船の航海速力としていた。しかし著者等の研究の結果によると、最も収益率の高い潜水タンカーの航海速力は、将来とも現在の上水タンカーと大差ないことが予想されるのであつて、Fig. 2 のような比較によつて得られた高速では、潜水タンカーの収益率は負となり、このような推定は誤りであることがわかる。

1-2 潜水商船の概要

さきに述べた新型式船舶のうち、潜水船はすでに潜水艦として多数の研究がおこなわれているため、技術的な見透しが得やすいこと、原子力機関を利用する上に興味深い実例であること等の理由で早くから他の新型式船舶より特別の関心が寄せられていた。潜水商船の利点をあげると、

- (1) 現在研究されている新型式船舶は、ほとんどが中小型船用として開発されているが、潜水船および waveless hull form ship は大型航洋船としても使用することができる。
- (2) 潜水商船は、造波抵抗がないため、高速時の推進性能が水上船より優れており、天候の影響をうけないこと、氷海の下でも安全に航海できること等の利点がある。特に太平洋と大西洋を北極海を通して航海できる可能性は無視できないものがある。

一方、潜水商船の欠点としては。

- (1) 浮上時の喫水が大きくなり、港湾への出入りが困難である。
- (2) 貨物船の場合、積荷機構が複雑で、開口部の水密に問題がある。
- (3) 大きな調整タンクを必要とするために、載貨重量 / 排水量 比が小さく、経済性が悪くなる。
- (4) 値段の高い原子力機関を使用しなければならない。

等が考えられる。潜水商船の研究は、すべて上記の欠点を補つて、どのようにして経済性を上げるかという問題に帰することができる。

なお潜水船は全重量が水中排水量に等しくなければ潜航することができない。このため比重の重い貨物を積載する潜水船では、原理的にバラスト重量を軽くすることができる。逆に海水より比重の軽い貨物を積む場合 (例えば油タンカーの場合)、水中の耐圧強度、浮上時の波浪による曲げモーメントを考慮して、船殻を十分丈夫に設計しても、なおかなりのバラストを塔載しなければならない。このような理由から、潜水商船には、むしろ鉱石運搬船のような船種のものが適していると考えられ、事実英国ではかなり具体的な検討がおこなわれた⁽⁶⁾。しかし一般に貨物船、鉱石運搬船のように耐圧船殻内に船倉をもっている潜水商船は、荷役設備に検討を要する多くの問題点をもっている。一方潜水タンカーは、多くのバラストを要する欠点があるが、後に述べるように、油倉を耐圧にする必要がないので荷役機構は簡単になる。このような観点からこの研究では、問題点の少ない油タンカーを選んだ。

2 船舶の経済性

さきに説明したように、新型式船舶の研究には、経済性の研究が特に重要な意義をもっている。このような開発研究の段階では、船舶の速度、大きさ、主機の種類等をパラメトリックに変化させて定量的な経済性を検討する研究が有効であるが、Benford はこれを optimization study と呼んでいる⁽²⁾。optimization study の考え方は、もともと船を一隻ずつ設計して経済性を検討しようというのではなくて、たとえば船舶の速度が一定範囲変つた場合の経済性の変化といった問題を、大抵みに研究するものである。一般の商船の場合では、charter base および hire base の考え方をういて、それぞれの船舶の採算を算出しているが、この方法では水上船と潜水船といった全く異なつた船舶の間の広範囲な経済性を比較することはできない。このような場合に適した経済性判定の基準として、Benford は資本回収率 (capital recovery factor, CRF) を用いることを提案している⁽²⁾。

資本回収率というのは、一般の工場設備の更新の採算を検討する OR 的手法として考えだされたもので、次の式で定義されている。

$$CRF = \frac{\text{年間利益}}{\text{投下資本}}$$

または、

$$(CRF)^{-1} = \text{投下資本回収年数}$$

すなわち設備の更新に要する費用（船の場合では建造費）を投下すべき資本とみなして、その設備の損得を、主としてその投下した資本の回収という観点から考えようとするものである。この場合投下資本回収年数 n 、利息 i の間には次の関係があることが知られている⁽²⁾⁽⁷⁾,

$$CRF = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}}$$

また資本回収率が、船舶の経済性検討の基準に適していると言うことの説明として、次の Benford の言葉を引用したい⁽⁶⁾。

「原子力タンカーが在来機関のタンカーと経済性が同一であるということは、言い換えると投資価値が同一であることを意味している。この定義では原子力タンカーが商船としてなりたつためには、単に幾分かの利益があると言うことだけでは不十分で、建造費の安い在来型船と同じ位の年月の間に船価を償却するに十分な年間の利益をあげなければならないことになる。すなわち原子力タンカーへの投資に対する利益率が、在来船の利益率と同じなら原子力船は経済性があるといえるのである。特別の目的がなければ、わざわざ利益率（すなわち CRF）の悪い企業に投資することは考えられない。」

著者等の研究も主として Benford による optimization study の方法に従って行ない、経済性判定の基準としては、資本回収率および現在の海運界で最も一般に用いられている載貨重量トン当りの運送原価を用いた。

3 設計上の問題点と仕様の概要

3-1 潜水タンカーの船型

潜水タンカーは、往航、復航共に常時潜航して航海するから、水中の航海に適した船型でなければならないのは当然である。しかし荷役は、特別に設備された水深の十分深い港でおこなうとしても、修理その他のために入渠は考えておかなければならないから、浮上喫水は現在の港湾の水深程度としなければならない。

潜水船の抵抗は、主として摩擦抵抗と形状抵抗によるものであるから、抵抗の観点からは、浸水表面積が少く、流れに無理のない円形断面（回転体）のものがよい。しかし円形断面の潜水船は、喫水が深くなるから、実用の船型としては、かなり扁平な断面のものになると思われる。一例を示すと、 $L/B=7$ の円形断面潜水タンカーで、載貨重量 20,000 ton とすると喫水は約 20 m 程度となる。

Fig. 4 ST-2型の潜水タンカーの全抵抗係数曲線

本研究では、工作の都合も考えて、潜水タンカーの船型として、矩形断面のものを採用することにした。矩形断面の潜水船はRusso等⁽⁸⁾によつて研究されたことがあり、詳細な試験設計もおこなわれたが、水槽試験に関する資料が不十分なために、実用性については危惧するところが多かった。このため本研究の当初に、1隻の円形断面潜水船と4隻の矩形断面潜水船の模型を製作して、船研目白第2試験水槽で、抵抗、揚力、縦揺れモーメントの計測を行ない抵抗および縦安定等の水中性能を確めた。

潜水船の船型研究に重要な要素として造波抵抗の問題がある。本研究の対象となつている潜水タンカーは、造波抵抗の無視できるような十分深い深度を航海するものである。しかし潜水船のもう一つの考え方として、航海深度を浅くとり、造波抵抗曲線がhollowとなる速度（Fig. 4 参照）をねらつて航海し、耐圧船殻の強度を減じて、船体を軽くする方法がある。本研究も最初このような方法による、経済性の向上を重視し、Fig. 4に示すように、浅い深度の水槽試験を多数おこなつた。しかし船体の設計がすすむにつれて、先に述べたように、タンカーの場合では、浮力の関係から船体重量を軽くすることが無意味となり、結果として造波抵抗の無視できる

ST-2 型艇

側面図

Fig.3 ST-2 型の潜水タンカーの線図

Table.1 ST-2 型潜水タンカー模型の主要目と C_p カーブ

L (m)	4900	C_p	0.829
B (m)	0700	C_{D_0}	0.810
D (m)	0350	C_{D_0}	0.978
$\nabla_{\text{Hull}}(\text{m}^3)$	0.972	$\nabla_{\text{Hull}}(\text{m}^3)$	0.189F
$\nabla_{\text{With all app}}(\text{m}^3)$	0.985	$\nabla_{\text{With all app}}(\text{m}^3)$	0.174F
$S_{\text{Hull}}(\text{m}^2)$	8.354	$S_{\text{Hull}}(\text{m}^2)$	0.175
$S_{\text{With all app}}(\text{m}^2)$	9.200	$S_{\text{With all app}}(\text{m}^2)$	0.177
L/B	7.000	L/B	0.60
B/D	2.000	L/D	0.60

Photo.1 ST-2 型潜水タンカー模型

Photo. 2 ST-3 型潜水タンカー模型の3分力試験 (模型の長さ 4.5 m, 没水深度 0.562 m, Froude 数約 0.25)

は漸定的な意味のものである。しかしながら、本研究の結果から考えると、最良な潜水タンカーの推進性能が ST-2 型よりもかなり改善されたとしても、潜水タンカーの経済性の評価を大幅に変更するようなことにはならないと思われる。

ST-2 型の全抵抗係数曲線を Fig. 4 に、3 分力試験結果を Fig. 5 に示す。また ST-2 型を、載貨重量 30,000 ton (水中排水量 57,510 ton) の実船に換算した場合の軸馬力曲線を Fig. 6 に示す。

なお、軸馬力の計算に当つては、従来の資料から、推進係数の値として、ST-2 型の 1 軸のものについては 65%、2 軸のものについては 60% と仮定した。

水槽試験で得られた主な結果をあげると次の通りである。

(1) 矩形断面潜水船は円形断面の潜水船に比べて、深い深度の水中抵抗が大きくなることが予想されていたが、本水槽試験の結果によると、この差は比較的少く (Fig. 24)、潜水船船型として矩形断面を採用することは可能である。

(2) この研究で用いたような、 C_p の大きい (C_p が 0.83 前後) 矩形断面潜水船船型では、浅い深度にお

Fig. 5 ST-2 型潜水タンカーの3分力試験

Fig. 6 潜水タンカー (ST-2 型, 2 軸) の SHP 曲線

ける造波抵抗曲線の hump, hollow が極端で, $Fn=0.25, 0.36$ 前後の hollow の速度では造波抵抗は, 著しく少なくなっている。したがって浅い深度を航海する潜水船は, このような速度および船型を利用することが有利だと考えられる。(このことは C_p の大きな円形断面の没水体についても Eng, Hu⁽⁹⁾ によっても研究されて同様な結果を得ている。)

(3) 船橋と主船体の造波抵抗の相互干渉は無視できないものがある。例えば船首より $9/20L$ の位置に船橋をつけた潜水船の場合, $Fn=0.24\sim0.33$ 附近の速度では, 船橋は, あたかも水上船の船首バルブのような効果をもち, 主船体だけの全抵抗より, 船橋付船体の全抵抗の方が少なくなるといった現象を呈する。(このことは九尾, 石井⁽¹⁰⁾によっても研究されている。)

(4) 矩形断面潜水船の3分力試験結果 Fig. 5 を見ると, 縦方向静安定係数は若干大きな値を示しているが, 水中航走に不適当な値ではないことがわかる⁽¹⁵⁾。

3-2 潜水タンカーのタンクの構成

潜水船の設計は, 潜水船の全重量が水中の浮力に等しいこと, 予備浮力が Main Ballast Tank に入る海水の重量に等しいこと, 重心と浮心の位置は同一鉛直線上にあること, を基本的な原則として出発する。この原則は, 貨物の満載時, 軽荷時を問わず必要で, この他海水温度, 海水比重, 食糧, 水の消費等によつて浮力が変動した場合にも, 同様にこの条件が満足されなければならない。このため潜水タンカーには Table. 2 に示すような各種の調整タンクが必要となる。

Table 2 諸タンクの容積等

	タンクの名称	略称	タンクの機能	タンクの容積(m ³)	容積算出基礎
非耐圧タンク(外殻)	Main Cargo Tank	MCT	主貨物タンク	0.971 C. W. (CETの容積を含む)	$\frac{C. W.}{1.03}$ 1.03は海水比重
	Cargo Expansion Tank	CET	貨物油の温度および圧力変化による容積の調整(MCTは CET を通して海水に通じている)	0.0388 C. W.	MCT 容積の 4%
	Main Ballast Tank	MBT	潜入および浮上(予備浮力)	0.1 Vs	設計仕様による
耐圧タンク(内殻)	Variable Ballast Tank	VBТ	貨物油の温度および圧力変化による浮力の調整。消費材の重量変化, 海水比重の変化による浮力の調整。前部トリムタンク, 後部トリムタンク, および補助タンクに分けられる。	0.0683 C. W.	載貨重量の 7% の重量変化を調整する
	Variable Cargo Tank	VCT	貨物油の比重の違いによる貨物重量の調整	0.362 C. W.	$C. W. = [(MCT) + (VCT)] \times 0.75$ 0.75は最も軽い重油の比重

C. W. は D. W. から一般設備重量 (500ton) を引いたものを示す。

最初に, 貨物油の比重の違いを調整する方法について説明する。潜水タンカーは, 軽荷状態(往航)では貨物油槽に海水を入れて潜航する。したがって, 最も重い貨物の比重を, 海水比重 (1.030) と等しくとり, この状態では Main Cargo Tank (MCT) だけに海水を満載し, Variable Cargo Tank (VCT) は空とする。また逆に, 最も比重の軽い貨物油を積んだ場合には, MCT と VCT にそれぞれ油を満載することになる。中間の比重の貨物油の場合には, VCT の一部に油を積んで, 油の比重に無関係に貨物油の全重量が一定となるように調整する。

Main Cargo Tank は非耐圧タンクで, Cargo Expansion Tank (CET) を通して, 海水に通じており, 貨物油の温度圧力等による容積変化を CET で調整する。また水, 食糧等の消費による重量変化, 海水比重の変動による浮力等の変化は, Variable Ballast Tank (VBТ) で調整する。また船体の浮上, 潜航は Main Ballast Tank (MBT) の海水を注排水しておく。したがって予備浮力は MBT に入る海水の重量と等しくなる。

潜水タンカーのタンク配置の例を Fig. 7 に示す。

3-3 研究の対象とした潜水タンカーの範囲

研究の対象とした潜水タンカーは,

載貨重量 20,000 ton~40,000 ton

連続最大出力 20,000 SHP~120,000 SHP

のもので, これ以外の範囲のものは, 別に検討した。潜水タンカーの経済性は, 水上タンカーから類推すると, より大きな載貨重量の船ほど運航採算がよいことが予想される。しかし, 港湾事情を考慮して, 一応浮上喫水を 14m 以下に制限したので, この喫水に対応する潜水タンカーとして載貨重量 40,000 ton が上限となつた。連続

Fig. 7 一般配置図

最大出力については、1軸の最大出力を 60,000 SHP と考え、2軸船の場合を考慮して最大 120,000 SHP を上限とした。60,000 SHP 以下では、1軸船と2軸船の両方を検討した。

3-4 潜水タンカー仕様の概要

航路

ラスタヌラ、下津間約 6,400 sea miles

主機関

原子炉の型式は加圧水型とし、重量、価格等の資料は文献 (11) によった。

緊急補助動力

2軸船の場合は、おのおの独立な推進プラントを、独立な耐圧船殻内に設けているので、応急の補助動力は設備しない。1軸船の場合は、主機関が故障した場合には浮上して油焚きボイラーを用いて低速航海するものとした。

船型

矩形断面潜水船 ST-2 型 ($L/B=7$, $B/D=2$) とした。

航行深度および強度

通常の潜航深度は 50 m~100 m とし、安全潜航深度は 200 m とした。耐圧船殻 (内殻) の強度は、200 m の水圧に対し 1.5 倍の安全率を考慮した。また非耐圧船殻 (外殻) は、水上タンカーと同程度の縦強度になるように設計した。なお水槽試験の結果によると、(Fig. 4 参照) ST-2 型の船型で、全長を 200 m と考えると、Froude 数が 0.3 前後の速度で、造波抵抗が無視できるようになるには、潜航深度を 60 m 以上にとればよい。

予備浮力

予備浮力は、水上排水量の 10% とした。ただし緊急時には、一部の貨物油を blow することによつて、20% の予備浮力が確保できるように考えた。

貨物油の比重

貨物油は原油とし、その比重は 0.75 以上、1.03 以下とした

浮上喫水

浮上喫水は 14 m 以内とする。

乗員

乗員は船の大きさ、速さに無関係に 50 人と仮定した。

4 潜水タンカーの設計

潜水タンカーの設計および経済性の検討は、Fig. 1 に示す flow chart に従つてすすめられた。Fig. 1 からわかるように、この研究は最初に水槽試験結果および外的な諸条件から最適船型を定め、この船型について載貨重量および連続最大出力を変数とした場合の経済性の変化を調べたものである。

4-1 容 積

容積の決定に関しては、文献(8)に矩形断面潜水タンカーのかなり詳細な設計をおこなつた結果が発表されているので、この論文に負うところが多い。

容積は、文献(8)の方法にしたがい機関部容積とその他の容積の2つの部分に別けて算出した。すなわち機関部容積は連続最大出力に比例すると考え、その他は貨物重量(載貨重量より後述の一般斉備重量を引いたもの)に比例すると考えた。また予備浮力は水上排水量の10%としているので、水中排水容積 V_T 、水上排水容積 V_S は、次のように表わされる。

$$V_T = 1.1 V_S = 1.1 (C_1 \cdot C.W. + C_2 \cdot SHP)$$

C.W. は貨物重量、 C_1, C_2 は定数を示す。

C_2 の値に関しては、原子炉に関する詳細な設計資料がないので、文献(8)の値 $3.00 \text{ ft}^3/\text{SHP}$ ($0.085 \text{ m}^3/\text{SHP}$) を用いた。

載貨重量に比例する容積の中で重要なものは、各種タンクの容積であるが、これを表にしてTable. 2 の中に示す。またタンク以外の容積については Table. 3 のように考えた。

Table 3 諸タンク以外の容積

	容 積 (m^3)	容 積 算 出 基 礎
cargo pump room	0.0567 C.W.	主として水上船の実績による。
crew, store, access, operating room etc.	$1.410 + 0.0285 \text{ C.W.}$	文献(8)による
free flooding space	0.0133 C.W. $\left(= 0.01 \times \frac{\text{C.W.}}{0.75}\right)$	free flooding space は、水中排水量に対して、ほぼ一定の比率をもっているので従来の資料から左記の如く仮定した。

これらの結果を総合すると、水中排水容積 V_T を求める算式として

$$V_T = 1.1 (1.410 + 1.539 \text{ C.W.} + 0.085 \text{ SHP}) \quad (\text{m}^3)$$

を得ることができる。(ただし C.W. は ton で示す)。

4-2 一 般 配 置

各部の容積が算出され、水中排水容積が決定すると、ST-2 型の船型で、この容積をもつ潜水タンカーの主要寸法がわかる。さらに一応の配置を考えて、各部の機能特にタンクの配置が種々の運航状態に支障がないかを検討した。

一般配置の例として、載貨重量 30,000 ton 連続最大出力 40,000 SHP の2軸船の場合を Fig. 7 に示した。この潜水タンカーは、2個の円筒形の耐圧船殻(内殻)と、その間をつなぐ1個の通路で構成され、耐圧船殻のまわりを非耐圧船殻(外殻)で囲み、外形は ST-2 型の船型となつている。

4-3 重 量 の 推 定

重量の推定には、潜水タンカーの重量を次の6個の項目に別けて各重量を検討した。

船殻部重量

船殻の材質は外殻を軟鋼、内殻を 50 kg/mm^2 の高張力鋼として重量を算定した。Table 4 に一例として、載貨重量 30,000 ton 連続最大出力 40,000 SHP の船殻部重量を示した。

ぎ装部重量

ぎ装部の重量推定には、ぎ装部を約 14 の小項目に別けて検討し、それぞれ水上タンカー、潜水艦等の実績から算出した。

Table 4 DW=30,000 ton, MCR 40,000 SHP の潜水タンカーの船殻重量 (10% の margin を含む)

	重 量 (ton)
内 殻	5,685
外 殻	4,340
間 隔 部	365

機関部重量

原子炉プラント重量は、文献(11)の資料を用いた。その他の機関部重量は、主として水上タービン船の実績に基づき、潜水船の特殊性を考えて推定し、軸馬力当り0.0435 ton とした。

電気部重量

電気部の重量は主として水上タービタンカーを参考にして定めた。電気部の内容は、電源装置、および電装諸装置である。

一般斉備重量

乗員は船の大きさと無関係に 50 人と仮定し、一般斉備重量は 1 人当り 10 ton と考えた。一般斉備重量の内容は、乗員、清水、食糧、手荷物類等である。

固定バラスト

水中排水容積 V_T に、船殻鋼材による容積を修正して浮力を算出し、重量の不足分は固定バラストで補なうものとする。鉄バラストの場合、水中では空気中重量の 1.15 倍の重量のバラストが必要である。

このようにして算出した各部重量および容積を載貨重量を横軸として Fig. 8 および Fig. 9 に示し、原子炉系の重量を Fig. 10 に示す。また参考に載貨重量 30,000 ton、連続最大出力 40,000 SHP の潜水タンカーの重量構

Fig. 8 潜水タンカーの各部重量

Fig. 9 潜水タンカーの水中排水量

Fig. 10 原子炉系重量 (文献 11 より転載)

Fig. 11 D.W. 30,000 ton M.C.R. 40,000 SHP 潜水タンカーの重量の構成

Fig. 12 潜水タンカーの主要目

成を Fig. 11 に示す。

水中復原性能の観点から、水中 BG が問題になるが、検討の結果、固定バラストが水中排水量の 6% あれば、最低限必要な水中 BG (載貨重量 30,000 ton の場合、約 0.3 m) がとれることがわかった。

4-4 潜水タンカーの主要目

潜水タンカーの容積および重量が算出されて、バラスト重量および復原性が検討されて後、主要目が決定される。載貨重量を変数、連続最大出力をパラメーターとした、潜水タンカーの主要目を Fig. 12 に示した。また載貨重量 30,000 ton、連続最大出力 40,000 SHP の潜水タンカーの主要目等を Table 5 にかかげた。

Table 5 D. W. = 30,000 ton, M. C. R. = 40,000 SHP の潜水タンカーの主要目等

全 長	189.0m
最大幅	27.0m
最大深さ	13.5m
喫水 (満載浮上時)	12.2m
水中排水量	57,510ton
水上排水量 (満載浮上時)	52,300ton
載貨重量	30,000ton
載貨重量/水中排水量	0.522
載貨重量/水上排水量	0.574

Table 6 建造船価の算定基礎等

項 目	価 格	算 出 基 礎
船 殻	船殻鋼材	73,000円/トン
	固定バラスト	20,000円/トン
	工費間接費	50,000円/トン
ぎ 装	材料費	400,000円/トン
	工費間接費	180,000円/トン
機	原子炉プラント	Fig. 13
	原子炉プラント以外の機関部	445,000円/トン
関	工費間接費	170,000円/トン
	材料費	1,000,000円/トン
電 装 気 装	工費間接費	270,000円/トン
	用役費, 経 費	上記の各工数の合計に対し平均150円/時間とする
管 理 費	用役費までの合計費用の5%	設計費, 保険料, 入渠料, 進水費, 式典費, 営業経費 (開発費は考慮しない)
利 益	総原価の 5%	主として水上船建造実績による。
乗 出 費 用	建造船価の 3%	

注 総原価, 建造船価, 総船価, 管理費までの合計。
総原価に利益を加えたもの。
建造船価に乗出費用を加えたもの。

5 船 価

船価は、船殻部、ぎ装部、機関部、電気部の各材料費、工間費、用役費、経費および一般管理費、販売間接費にわけて算出し、この合計を総原価とし、これに造船所の利益を加えたものを建造船価、さらに乗出費用を加えた総計を総船価と考えた。総船価の算定基礎を Table 6 に、原子炉系の価格を Fig. 13 に示した。

このようにして求めた潜水タンカーの総船価を、載貨重量を変数、連続最大出力をパラメーターとして Fig. 14 に、総船価の構成を、載貨重量 30,000 ton、連続最大出力 40,000 SHP の 2 軸船の場合を例にして Fig. 15 に示した。

Fig. 13 原子炉系価格 (文献 11 より転載)

Fig. 14 潜水タンカーの総船価

Fig. 15 D.W. 30,000 トン M.C.R. 40,000 SHP 2 軸推進の潜水タンカーの総船価の構成

Fig. 16 航海速力、軸馬力、載貨重量曲線

6 潜水タンカーの経済性

第 2 章で説明したように、本研究では経済性研究の基準として、資本回収率および載貨重量トン当り運送原価

を用いた。次に各経費の定義などを説明する。

年間荷物運送量

航海速力は、水槽試験結果より算出した実船の軸馬力曲線 Fig. 16 より求めた。ただし航海速力は連続最大出力の 90 % の常用馬力に相当する速力と考える。

年間稼働日数は 343.5 日とした。燃料交換は、2 年に 1 回、燃料交換以外の非稼働日数は、18 日/年と考えた。

碇泊日数は、水上タンカーの実績から推定して、1 航海当り 3.5 日とした。

年間荷物運送量の計算結果を Fig. 17 に示

Fig. 17 潜水タンカーの年間荷物運送量

Fig. 18 潜水タンカーの年間総経費

Table 7 年間船費および年間運航費内訳

項目	経費	算出基礎
船員費	50,000千円	1,000千円/人, 乗員 50 人
修繕費	D. W. 30,000 ton 40,000 SHPの場合 29,000千円	水上タンカーの実績の約50%増とした
保険料		建造船価の 1.5% とした
船用品費	10,000千円	水上タンカーの実績による
税金		建造船価の 0.24% とした
店費		650円/D. W. とした
金利		年 5% とした
償却		20年間の元利均等償還で、残存価値は 0 とした
燃料費		文献 (11) による
港費		一航海当り (360,000+36 D. W.) 円とした

Fig. 19-1 潜水タンカーの D.W. トン当りの運送原価

Fig. 19-2 潜水タンカーの D.W. トン当りの運送原価

す。

年間総経費

年間総経費は、船費および運航費で構成されているが、これらを Table 7 に示し、計算結果を Fig. 18 に示した。

Fig. 20-1 潜水タンカーの C. R. F.

Fig. 20-2 潜水タンカーの C. R. F.

Fig. 20-3 潜水タンカーの C. R. F.

Fig. 20-4 潜水タンカーの C. R. F.

載貨重量トン当りの運送原価

つぎの算式にしたがつて計算した,

$$(\text{載貨重量トン当り運送原価}) = \frac{(\text{年間総経費})}{(\text{年間荷物運送量})}$$

載貨重量トン当り運送原価の計算結果を Fig. 19 に示す。

資本回収率

つぎの算式にしたがつて計算した。

$$(\text{資本回収率}) = \frac{(\text{年間運賃収入}) - (\text{年間運航経費})}{(\text{建造船価})}$$

ただし年間運航経費とは、年間総経費より金利と償却を除いたものを示す。また、年間運賃収入は、そのときの運賃 rate によって変化するから、ここでは USMC flat (3,672 円/ton), USMC-20% (2,937.6 円/ton), USMC-40% (2,203.2 円/ton) の3種類について計算した。

資本回収率の計算結果を Fig. 20 に示す。

7 考 察

7-1 軸数が経済性におよぼす影響

Fig. 19, 20 より明らかなように、2軸の潜水タンカーは、1軸のものに比べて経済性が悪い。これは Fig. 15 からわかるように、潜水タンカーの建造費の半ば以上をしめる主機価格が高く、建造費全体に大きな影響を与えることが原因になっている。

この研究の結果として、高速の潜水タンカーは経済性が悪いことを先に述べたが、これらを考え合わせると、潜水タンカーの計画は1軸ですすめる方がよいと思われる。

7-2 船速が経済性におよぼす影響

14 ノット以下の低速の潜水タンカーの経済性を計算しなかつたので、やや不明確ではあるが、最も経済性の高い潜水タンカーの船速は、2軸船の場合は 15 knot 1軸船の場合は 16 knot の附近にあるように思われる。最適船速に与える載貨重量の影響は、さらに不明確であるが、載貨重量トン当りの運送コストを最小にする速度は、載貨重量が小さい場合、若干増加する傾向にある。1例を示すと、1軸船の場合、

載貨重量 (ton)	最適速力 (knot)
20,000	17
30,000	16.5
40,000	16

この報告の最初にのべたように、上記の最適速度は、従来の論文^{(8),(13),(14)}で期待されていたよりもはるかに遅い。この理由は、Fig. 15 からわかるように、潜水船の船速の増加に伴う抵抗の増加が水上船より少なくても、原子炉を含む機関部が高価なために、船速の増加に伴う船価の増大がはげしく、最適速度は水上タンカーとあまり変わらない結果になったものと思われる。

7-3 載貨重量が経済性におよぼす影響

Fig. 19 および Fig. 20 から明らかなように、水上タンカーと同様、潜水タンカーの経済性は載貨重量が大きくなる程よくなる。しかし、実用の潜水船として、実際に運航しうる最大の船の大きさは、水深から制限される浮上喫水の大きさで定まる。港湾の深さから許容される浮上喫水の大きさと、経済性の関係を調べる目的で、航海速力 16 knot の ST-2 型の船型をもつ 1 軸船について、許容浮上喫水を横軸にとり、その時に許される最大の載貨重量およびトン当り運送原価の関係を調べたものが Fig. 21 である。

7-4 潜水タンカーと水上タンカーとの経済性の比較

Fig. 21 許容浮上喫水と最大載貨重量およびトン当り運送原価の関係 (航海速力 16 knot 1 軸船ラストスラー下津間の場合)

文献⁽¹¹⁾による在来型水上タンカーおよび原子力主機による水上タンカーの経済性の調査結果を用いて、潜水タンカーとの経済性の比較を行なう。ただし、文献⁽¹¹⁾では、運航採算の算出に当つて、金利 8%、残存価値 10% の 18 年等価償却を仮定しているが、この研究では金利は 5%、償却年限を 20 年としている。著者等の考えでは、文献⁽¹¹⁾の金利は、若干高く見積り過ぎている。しかし、同一条件のもとで比較しなければ無意味であるから、載貨重量トン当り運送原価を、文献⁽¹¹⁾の金利および償却年限と同条件に換算して、水上タンカーと比較したものを Fig. 22 に示した。この図から、潜水タンカーは、在来型的水上タンカーだけでなく、原子力の水上タンカーとくらべても一層経済性が悪いことがわかる。この主な原因は、Fig. 15 からわかるように、潜水タンカーの船価の半分以上をしめている主機関の価格が高いこと、大きな調整タンクを必要とするため、載貨重量 / 水中排水量の値が小さいこと (約 0.52) 等によつてゐる。このために原子炉価格および原子燃料費が同じ比率で低減した場合の載貨重量トン当り運送原価を計算し、Fig. 23 に示した。この計算に用いた潜水タンカーは、載貨重量 40,000 ton、主機出力 20,000 SHP、航海速力 16 knot のものである。この図によれば、原子炉価格および燃料費が在来型の主機および燃料とほぼ同程度に安くなれば在来型タンカーと経済的に競えないように思われる。

Fig. 22 水上タンカーと潜水タンカーの経済性比較

Fig. 23 原子炉および燃料費低減の場合のトン当り運送原価

8 結 論

現在の研究の段階では、潜水タンカーの設計に実際に役立つ資料はきわめて少く、本研究で求めた船価および運航費等は、もちろん厳密なものではない。しかし、Benford⁽¹²⁾は、資本回収率を optimization study に適用することの大きな利点として、資本回収率を最大にするような船速を、船舶の最適速度と考えると、船費および運航費が多少変化しても、上記の最適速度の選定には、ほとんど影響を与えないことを示している。しかし、ここでは許容浮上喫水の変化、原子炉価格の変化などの重要な条件の変化についても別に調べた。

この研究では、潜水タンカーが、現在的水上タンカーのように通常の輸送機関として数多く建造および運航されていることが仮定されており、3章の仕様もこの基礎の上に設定されている。したがって研究、開発に必要な費用は、この研究から除外されている。このような条件のもとで、経済性の最良な潜水タンカーを調べた結果浮上喫水を 14m に制限した場合では、この制限喫水に対応する最大の載貨重量である 40,000 ton の船体で、航海速力が約 16 knot (連続最大出力 20,000 SHP) の 1 軸船であることがわかった。経済性の判定には、資本回収率と載貨重量トン当り運送原価を用いたが、最も経済性の高い潜水タンカーの速力はほぼ一致した。

水上の在来型タンカーおよび原子力タンカーと経済性を比較した結果は、潜水タンカーが著しく経済性が悪いことがわかった。この理由は、原子力主機が高価であることと、排水量に対する載貨重量の比が小さいこと等によつてゐるが、この他、最大の載貨重量が浮上喫水の点から、水上タンカーより小さくおさえられることも重要な要素となつてゐる。

また、この潜水タンカーの場合、船殻部重量は総重量の約 1/6 であるが、この他船殻部重量の 1/2 以上の固定バラストを必要とする。したがって最初に述べたように潜水船としては、比重の重い貨物を積載して、固定バラストの量を少なくする方が経済的であることは、この研究からも確めることができた。この他潜水船の特徴を最大

に利用する方法として、例えば太平洋と大西洋を北極海を通して航海することは、今後とも検討の必要のある問題だと思われる。しかし Fig.20—2 および Fig.20—4 からわかるように、貨物運賃が変化しても、最適速力にはほとんど変化がないことは、興味深い。

なお、この研究に関連した問題として、矩形断面の潜水船の水中性能を詳細に調べたが、その一部を Fig.4, 5, 6 および附録に示した。

9 謝 辞

原子力潜水タンカーの経済性に関する研究は、昭和 37 年以来、船舶技術研究所推進性能部と川崎重工業(株)潜水艦設計部の共同研究として、船研推進性能部横尾幸一郎長、田崎 亮室長、川崎重工業、潜水艦設計部仁瓶廉三部長の指導のもとに実施されたものである。また、本研究全般にわたって、船研土田陽部長、川重平野美木部長より多くの有益な助言を賜わった。また水槽試験に関しては船研伊藤達郎室長のご指導と目白水槽各位のご努力によるものであることを附記して、上記の諸氏に深く感謝の意を表したい。

附録 水槽試験の概要

潜水船に適した船型を選出する一般的な条件として、

- 1) 浮上喫水が小さいこと、
- 2) 水中における推進性能および縦安定性能が良好なこと、
- 3) 耐圧船殻、調整タンクなどの配置に無理がないこと

などがある。この条件を満足する船型として、Fig.24 中の表に示すような系統的な4隻の矩形断面潜水船の模型を製作し、さらに、比較の目的で製作した1隻の円形断面の潜水船模型(この船型は従来の設計資料では、水中抵抗が最も少ないと考えられている)を加えて5隻の模型船の3分力(抵抗、揚力、縦揺れモーメント)試験をおこなった。

水槽試験は長さ約5mの木製模型を使用し、strain gage を用いた模型船内蔵型の3分力計で試験をおこなった。

水槽試験の結果から、水中排水量65,000tonに換算した場合の、造波抵抗が無視できる深度にある実船の

Fig. 24 水槽試験を実施した潜水船模型の種類と同船型を65,000tonの実船に換算した場合の軸馬力の比較(深度無限大の場合)

Fig. 25 主船体造波抵抗係数(cwh)の比較

軸馬力の比較を Fig.24 に、また1例として、浅い2種の深度にある場合の造波抵抗係数(cwh)の比較を Fig.25 に示した。この造波抵抗係数 cwh は、主船体の全抵抗から造波抵抗が無視できる深度における主船体の抵抗をさし引き、浸水表面積を用いて無次元化したものである。

Fig.24 からは、本研究の試設計で用いた、ST-2 型が、円形断面のものを除けば、最も低い軸馬力を与えていることがわかる。ただし、推進効率、円形断面のものについては 65%、矩形断面については 60% と仮定した。

また, Fig. 25 からは, このような C_p の大きな船型の造波抵抗は hump, hollow が極端で, 浅い深度の潜水船を考える上に, 興味深い問題点であることがわかる。

文 献

- (1) Mandel, P. ; "A Comparative Evaluation of Novel Ship Types", T. SNAME 1962.
 - (2) Benford, H. ; "Principles of Engineering Economy in Ship Design", T. SNAME 1963.
 - (3) Benford, H. ; "Engineering Economy in Tanker Design", T. SNAME, 1957.
 - (4) Benford, H. ; "Ocean Ore-Carrier Economics and Preliminary Design", T. SNAME 1958.
 - (5) Benford, H. ; "The Commercial Feasibility of Nuclear Tankers", Proceedings of American Petroleum Institute Vol. 37 (V) 1957.
 - (6) Crewe, P. R. and Hardy, D. J. ; "The Submarine Ore Carrier", T. RINA 1962.
 - (7) 泰恒雄 : "設備更新の経済理論" 日刊工業新聞社, 昭和 38 年 1 月
 - (8) Russo, V. L. Turner, H. and Wood, F. W. ; "Submarine Tankers", T. SNAME Vol. 68, 1960.
 - (9) Eng, King and Hu, Pung N. ; "Wave-Resistance Reduction of Near-Surface Body", Davidson Laboratory Report 933, March 1963.
 - (10) 丸尾 孟, 石井正夫 ; "極小造波抵抗を有する半没水船" 造船協会論文集 114 号 1963 年
 - (11) 日本原子力船研究協会, 設計部会, 技術経済分科会, "在来船および原子力油送船の運航採算" 原船協報告 1962 年
 - (12) Benford, H. "Short-cuts in Ship Cost Studies", Marine Engineering/Log, April 1959.
 - (13) Teasdale, J. A. ; "Characteristics and Performance of Nuclear Powered Submarine Cargo Vessels", T. NECIES Vol. 75
 - (14) Todd, F. H. ; "Submarine Cargo Ships and Tankers", 3rd Symposium on Naval Hydrodynamics, 1960.
 - (15) 土田 陽, 平野美木, 黒田七郎, 田中拓, 津垣昌一郎, "潜水船の縦安定性能" 造船協会論文集 107 号 1960 年
-