(昭和 45 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

船尾形状を異にする巨大船の 尺度影響について

正員 横 尾 幸 一* 正員 高 橋 肇*
正員 川 上 善 郎*

Scale Effect of Full Hull Forms with Various Stern Shapes

by Koichi Yokoo, *Member*

Hajime Takahashi, *Member*

Yoshiro Kawakami, *Member*

Summary

In order to investigate the effect of the stern shape on the scale effect of resistance and self-propulsion factors, each two geosims were tested for the hull forms with four types of different sterns, which are U shape frame lines with normal and swelled sterns and V shape frame lines with single and twin screw propellers.

As expected beforehand, V shape of frame lines gives lower form factor values both under full and ballast load conditions. At the full load condition tendencies of variation of form factors for each hull forms are quite similar to each other, contrary to our expectation, and values of form factor increase gradually with the increase of Froude no. Whereas, at the ballast condition, hump and hollow exist on the $(1+K)$ curves throughout the speed range tested.

The values of the wake and thrust deduction coefficients vary considerably owing to the variation of the stern shapes, but the scale effects of the self-propulsion factors are not so great in this scale range of rather big models.

Authors introduce the new parameter l_m/D , to define the mean clearance between a ship and a propeller and some discussions about the relation between nominal wake and effective wake, and about the scale effect of wake are presented.

1 緒 言

船体抵抗は造波抵抗と粘性抵抗の2つに大別することができ、尺度影響に関係するものは後者である。粘性抵抗は摩擦抵抗と形状抵抗とに分けられるが、形状抵抗の大小は船尾形状と大いに関係があると想像される。また自航要素の大小に大きく影響するのも船尾の肥せき度や形状である。

最近、多くの研究者により、抵抗成分や形状影響係数 $(1+K)$ の解明などが盛んにおこなわれているが、すべての船尾形状要素を取入れて整理できる段階にまではなっていない。1つ1つの船型要素の影響は取り出せても総合的な解明にはほど遠いといえよう。

船研推進性能部においては、最近数年にわたって、肥大船の数種の船尾形状について相似模型の試験を行なった。本報告においては、その試験結果についてのべるとともに若干の考察を加えることにより、この種問題点の提起を行ないたいと思う。なお代表的船尾形状として、U型フレームライン形状で普通型および膨出型の船尾をもった船型、V型フレームライン形状で1軸および2軸船型、以上4種の船尾形状をえらび、それぞれに対して長さ 8m および 12m の相似模型を製作し実験を行った。

* 船舶技術研究所推進性能部

Fig. 1 Body Plans and Contours of Stern

Table 1 Proportions and Coefficients of Models

Shape	Normal stern U shape		Swelled stern U shape		V shape		V shape	
M. S. No.	0021	0023	0041	0025	0073	0024	0074	0026
L_{PP} (m)	8.000	12.000	8.000	12.000	8.000	12.000	8.000	12.000
L_{PP}/B	6.326		6.326		6.326		6.326	
B/d	2.990		2.990		2.990		2.990	
C_B	0.809		0.809		0.810		0.811	
C_P	0.815		0.815		0.816		0.817	
C_M	0.993		0.993		0.993		0.993	
I_{CB} (%)	-2.60		-2.55		-2.62		-2.44	
No. of Propeller	1		1		1		2	
Propeller used	0003	0005	0003	0005	0003	0005	0031 $\frac{R}{L}$	0032 $\frac{R}{L}$

2 模型船および模型プロペラ

8m のパラフィン模型船 4 隻と 12m の木製模型船 4 隻は、それぞれ 2 隻ずつの相似模型船となっている。各 4 隻の模型船は同一の船体前半部を有し、船体後半部形状が異なっている。8m 模型船の正面線図と船尾輪郭を Fig. 1 に、模型船の主要目を Table 1 に示す。船首には 10% の大きさの突出バルブがついている。

模型プロペラは、1 軸船用および 2 軸船用があり、3 隻の 1 軸船については、同一のプロペラを使用した。模型プロペラの主要目を Table 2 に、プロペラと模型船との組み合わせを Table 1 中に示す。

模型船の製作誤差の一例を Fig. 2 に示すが、十分試験可能な製作誤差内にある。ただし船首尾部においては幾分誤差量が大きくなっているが、これは船首尾部形状の特殊性からくる計測法に原因するものである。

Table 2 Particulars of Propeller Models

M.P. No.	0003	0005	0031 $\frac{R}{L}$	0032 $\frac{R}{L}$
Diameter (m)	0.2152	0.3228	0.1862	0.2703
Boss ratio	0.173		0.180	
H/D	0.777		0.888	
E. A. R.	0.635		0.520	
B. T. R.	0.046		0.050	
Angle of rake	0 degree		0 degree	
No. of blades	6		5	
Blade section	Troost		MAU

(a)

(b)

Fig. 2 Examples for Accuracy of Ship Model

この式による速度修正量は 12m 模型で約 0.7%, 8m 模型で約 0.2% 程度である。対水速度計の修正としては、対水速度計の模型船におよぼす影響と対水速度計の読みの修正とがある。これらの影響を調べるために、三鷹第 2 船舶試験水槽において研究が進められ、既にその一部は発表されている²⁾。それによれば前者の影響は、いずれの模型船に対しても約 1% の抵抗減少をきたすと考えられ、後者の影響は 12m 模型船の場合約 0.6%, 8m 模型船の場合約 0.1% の速度減少をきたすと考えられる。

以上の修正を施した後の抵抗試験結果を剰余抵抗係数 r_R の形で Fig. 3 に示す。

満載状態においては、模型船の大きさにかかわらず、U 型フレームラインで普通型船尾形状をした MS 0021, 0023 の r_R が他の模型船に比べてかなり大きく、他の 3 種の船型の間の r_R の差は僅かである。予想されたよう

3 試験状態

試験のための載貨状態としては、満載状態（イーブン・キール）と満載排水量の 50% の排水量状態（1.4% の船尾トリム）との 2 状態とし、これらの状態に対して、抵抗、自航の両試験および伴流計測を行なった。またプロペラについては、プロペラ単独試験を 2 または 3 種類の回転数について行なった。

乱流発生装置としては、高さ 1 mm の梯形スタッドを S. S. No. 9 $\frac{1}{2}$ およびバルブ中心より前方へ 60° の位置に植えた。

4 抵抗試験

今回使用した模型船はかなり大きく、したがって三鷹第 2 船舶試験水槽（400m 水槽）中で試験を行なう場合においても、当然多少の blockage effect が入ってくる。また対水速度を計測したので対水速度計と模型船との相互影響も入ってくる。

blockage effect の修正には谷口氏の式を用いたが、こ

(a)

(b)

Fig. 3 Residual Resistance Coefficients Curves

Fig. 4 Relation between C_T and C_F
(Full Load Condition)

Fig. 5 $1+K$ Curves

にV型フレームライン形状のものが低い r_R を示している。50% load の状態でも MS 0021 および 0023 の r_R が最も高いことに変わりはないが、船尾部を膨出させた MS 0041, 0025 の r_R がかなり大きくなっている。

Hughes の摩擦抵抗係数 C_F を横軸として各フルード数ごとの全抵抗係数 C_T を置点したものを満載状態に対して Fig. 4 に示す。一定フルード数を結んだ傾斜より $1+K$ が求まるが、これらを Fig. 5 に示す。

満載状態の形状影響係数 K の値は、大巾に船尾形状を変化させたにもかかわらず、速度変化に対しては似たような変化の様子を示している。ただ数値的には、予想したとおり、V型フ

(a)

(b)

Fig. 6 Examples of Trim Curves

レームラインの場合に小さく、U型の場合に大きい。フルード数に対する $(1+K)$ 曲線の変化の様子は今迄に発表されたもの^{3),4)}と全く異なっており(ただし馬場氏の最近の論文⁵⁾とはかなり似た傾向にある)低速で小さく、高速で大きくなっている。その理由として考えられるものは、以前の資料はともにノルマルまたは小さなバルブつき船首船型に対するものであり、今回の船型がかなり大きな船首バルブをもつた船型であることが考えられる。すなわち船首バルブの存在が船側波形や船体まわりの圧力分布をかえてその結果としてトリムを変え、 $1+K$ の値に影響を及ぼしているものであらう。Fig. 6 に示されるトリム曲線を参考にして考えてみると、満載状態の場合には船首バルブなし船型に比して高速になるにしたがつてトリム量が多くなっているようだ。その結果 $1+K$ が増加していくのではなからうか。また2軸V型船型の場合に低速で K が負になっているが、これはボッシングの存在が他の船型と異なつた影響を及ぼし、そのために負の K をもつようになったとも考えられるが、いずれにせよ2軸船型の場合にはボッシングまわりの流れについて詳細に検討する必要があると思われる。

バラスト状態の $1+K$ 曲線の特徴としては、 K の求め方の精度を考慮してもフルード数に対して波をうっていること、低速において満載状態の K の値より高いこと、とくに2軸V型船型の $1+K$ の値が非常に大きくなっていることがあげられる。満載状態に比して $1+K$ が大きいのは初期トリムがついているためと考えられる。トリムがフルード数に対して殆んど変化していないのに $1+K$ 曲線上に生ずる山および谷は、この模型船特有の現象とも思われるが、原因をつきとめるにはさらに詳細な実験たとえば船首および船側波形の調査等が必要である。

一般に船型要素の $1+K$ に及ぼす影響を明確にすることは現在の段階では困難であるが、船研推進性能部において今迄に行なわれた相似模型による満載状態の試験結果の数例を Fig. 7 に示す。これらはすべて船首バルブつきの船型であるが、 $1+K$ のフルード数に対する変化模様から大別して2種類の $1+K$ 曲線に分けられる。これらを便宜的にAおよびB型とする。図中 A_B の意味は低速において $1+K=1$ で、高速で $1+K$ が僅かに1より大きくなつたことを意味する。この図より、A, B型のいずれに属するかは1) 1軸であるか2軸であるか、2) C_B がどの程度であるかによつてほぼ決まると思われる。例えば2軸船型の場合には $C_B=0.85$ 前後ではA型、 $C_B=0.82$ 前後ではB型である。1軸船型については C_B の極端に大きい船型の尺度影響試験を行なっていないが、2軸船型に比してA型となる C_B は小さいと思われる。

なお、今回の8隻の模型船に対して、Hughesの方法により低速抵抗から求めた $1+K$ の値は、模型船の大小、種類によつて多少異なるが、ほぼ1.3程度であつた。

5 プロペラ単独試験

模型プロペラ6個について、回転数を2~3種類に変化させてプロペラ単独試験を行つた。

M. P. 0003 および 0005 (1軸船用模型プロペラ) についての試験結果をレイノルズ数 $R_n = \frac{nD^2}{\nu}$ を横軸にとり、 K_T, K_Q および η_0 を置点したものが Fig. 8 である。

模型プロペラの特徴はレイノルズ数とともに変化している。すなわち K_T はレイノルズ数の増加とともに増加し、 K_Q は減少し結果的に η_0 は増加となつている。

2軸模型船用プロペラ M. P. 0031 R, L および M. P. 0032 R, L

Fig. 7 Type of $(1+K)$ on Various Hull Forms

Fig. 8 Scale Effects of Propeller Models' Characteristics

については M. P. 0031 R と M. P. 0032 R, M. P. 0031 L と M. P. 0032 L とが似かよった特性を示すが, R と L とはいくぶん異なつた傾向を示した。このためプロペラ直径およびピッチを検査してみたが, 異状はみあたらなかった。したがつて原因は他にあるものと思われるがとりあえず 2 軸船用プロペラ 4 個について Fig. 2 のような図面を作成することはあきらめた。

自航試験の解析にあたつては, それぞれのプロペラ単独試験結果を使用しているので, 上記の事実の自航要素におよぼす影響は無視できると考えられる。

6 自航試験

自航試験の際も, 抵抗試験時と同じく blockage effect, カレント・メータの影響が当然入ってくるわけであるが, 速度修正の形で整理を行なつた。

自航要素を Fig. 9-a, b, c, d に示す。満載状態では, 8 m 模型船の場合 $1-t$ 曲線が 2 つに大別されとくに 2 軸 V 型船型 M. No. 0074 の $1-t$ の値が低速でかなり小さい。12 m 模型船では, 8 m の場合とほぼ似た傾向を示しているがただ M. No. 0025 の $1-W_T$ が非常に低い。この原因等については後述する。また η_R は船型によつて余り大きな差異がない。パラスト状態については, 8 m の場合にやはり $1-t$ 曲線が 2 つのグループに分かれて

いる。また M. No. 0021 と 0073 の $1-t$ 曲線がフルード数によつて大巾に変化している。12 m の場合は全体的に 8 m と同じ傾向がみられる。

($1-W_T$) 曲線を尺度影響の観点から

Fig. 10 Scale Effects of Self-Propulsion Factors

Fig. 9 Self-Propulsion Factors

みると、U型よりV型に変化するにつれて $(1-W_T)_{12m}$ と $(1-W_T)_{8m}$ との差は次第に大きくなっていく傾向がある。これらについては7章においてさらに述べる。また尺度影響の模様を見やすくするために作成した図面を Fig. 10-a, b に示す。この図中で特に目立つものとして M. S. 0041 および 0025 (U shape with swelled stern) の満載状態の場合の $1-W_T$ 曲線である。他のものと比べて余りにも曲線の傾向が違うので、M. S. 0041 の再試を行なったが、この再試結果は前に行なった試験結果とほぼ一致したし、Fig. 6 に示されているトリム曲線あるいは7章において述べる伴流計測等から考えると、M. S. 0025 ($L=12m$) の試験結果が何らかの原因でまづかつたものではないかと思われる。 $1-W_T$ の尺度影響は、長さ 8m および 12m のように比較的大型模型船を使用する場合にはレイノルズ数とともにいくぶん増加するがとくに顕著ではない。しかし実船の場合にはどの程度になるかといった問題は依然未解決である。 $1-t$ については、 $1-W_T$ よりもさらに尺度影響は少ないが、1, 2 の例外を除いて僅かではあるがレイノルズ数の増加とともに減少する。また η_R の尺度影響も少ないと考えてよいであろう。

以上は自航要素の尺度影響を、大型模型船を用いて実験的に求めたものであるが、理論的に求めた自航要素の尺度影響⁶⁾の傾向と非常によく一致している。

M. S. 0021 および 0023 (U shape with normal stern) についてはプロペラ荷重度 K_T/J^2 を変化させた試験をも行なった。試験結果を Fig. 11 に示す。この図によれば満載状態とバラスト状態でいくぶん異なった傾向が得られている。プロペラ荷重度と自航要素の関係はあまりはつきりしないが比較的小型模型での試験結果に比べて、このような大型模型では荷重度の自航要素におよぼす影響は小さいこと、船の自航点でも模型の自航点でも尺度影響はほぼ似たような量であることが知られる。

荷重度のスラスト減少係数 t におよぼす影響として Tsakonas の式⁷⁾では

$$t = 2w \left\{ \frac{-1 + \left(\frac{8K_T}{\pi J^2} \right)^{1/2}}{\frac{8K_T}{\pi J^2}} \right\}$$

また一般的には

$$t = f(w, K_T)$$

と表わされるが、Fig. 11 によれば荷重度の影響はあまり大きくないことがわかる。

7 伴流計測

伴流計測は、くし型ピトー管を使用し

M.S.NO.	MODEL LENGTH (m)	SELF-PROPULSION POINT	FULL LOAD				50% LOAD			
			0.12	0.14	0.16	0.18	0.14	0.16	0.18	0.20
0021	8.0	SHIP	○	△	○	○	○	○	○	○
		MODEL	○	△	○	○	○	○	○	○
0023	12.0	SHIP	○	△	○	○	○	○	○	○
		MODEL	○	△	○	○	○	○	○	○

Fig. 11 Combined Effect of Model Size and Propeller Load on Self-Propulsion Factors

Fig. 12 Wake Patterns (Full Load Condition, $F_n=0.17$)

Fig. 13 Wake Patterns (Ballast Condition, $F_n=0.19$)

て前進時および後進時について行なわれた。ただし後進時の計測は M. S. 0041, 0025 を除いて満載状態のみ、また M. S. 0021 については計測を行なわなかった。

前進時の計測結果を伴流分布図の形で Fig. 12 および 13 に示す。図中ハッチングを施した部分は (総圧-静圧) ≤ 0 を示した範囲である。

一般にU型からV型に変化するにつれて伴流分布図にあらわれている渦状流れが消滅してゆく。2軸船型の場合、ボシングの影響と船体の影響とをうけ非常に複雑な伴流分布を示している。とくに最大伴流値がボシングの真うしろの領域には存在しないでいくぶん上方によつた部分—とくに8m 模型船では—に存在することは興味深い。

Fig. 14 Distance between Propeller and Hull

Fig. 15 Relation between W_N or W_T and $1/(l_m/D)$

12m 模型船の伴流分布は 8m の場合の等伴流値曲線を少しだけ中心によせた程度で傾向そのものには大差ない。

伴流の大きさはその計測位置と物体との距離に関係するであろうことは容易に想像できるが、今回1つの試みとして、プロペラの0.7R上の1点と進行方向に計った船体との距離 l および water line の傾斜角 α がプロペラ1回転中にどのように変化するかを線図上より求めてみた。結果を Fig. 14 に示す。ただし2軸船型については除外した。 α については余り大差はないと考えこの図よりプロペラ位置と船体との平均距離 l_m を求め、

Fig. 16 Relation between W_N and W_T

$1/(l_m/D)$ を横軸に nominal wake W_N および effective wake W_T を置点したものが Fig. 15 である。 l_m が十分大きい場合には W_N と W_T の値が一致し、 l_m が小さくなるにつれて、両者の値が離れていく。

W_N と W_T との関係を Fig. 16 (図中の番号は簡略化された模型船番号を示す。例 M. S. 0026 → 26) に示す。同図中には船尾バルブ・シリーズ (M. S. 0043, 44, 45, 模型船長さ 8 m, 他の主要目はこの模型船群と同じ) の結果⁸⁾、および Lindgren 等により得られた結果⁹⁾をも示した。

主要目が同じ船型であつても W_N, W_T の値そのものも、また W_N, W_T との関係も非常に変わってくる。すなわち今回行なつた一連の試験においては、 $W_N < 0.5$ の場合には W_N と W_T とはほぼ linear の関係にあるが、 W_N が 0.5 をこすと (l_m/D が 0.8 をこすと表現してもよいかもしれない)、 W_N と W_T との関係曲線の傾斜はゆるやかになる。一方バルブシリーズ (M. S. 0043, 44, 45) では $W_N = 0.7$ までも W_T との linear の関係が保たれている。換言すれば、 $W_N > 0.5$ からは船尾形状により大巾に W_N と W_T との関係が変化する。この現象は渡辺氏の論文¹⁰⁾中の“Nominal Wake と Effective Wake との関係”にのべられている

C_B	小	大	超大
$\left(\frac{\text{Nominal Wake}}{\text{Effective Wake}} \right)$	0.9	1.2	0.9

の関係が今回の試験では船尾形状を変化させることにより得られたと考えてよいであろう。

つぎに尺度影響という観点から Fig. 16 を検討する。 W_N の比較的小さい値を示す V 型船型においては、 $(W_N)_{8m} - (W_N)_{12m} \doteq (W_T)_{8m} - (W_T)_{12m}$ の関係が成り立つが、U 型船型に変化するにつれて $(W_N)_{8m} - (W_N)_{12m} > (W_T)_{8m} - (W_T)_{12m}$ となってくる。したがって $(1 - W_s)/(1 - W_m)$ の問題を取扱う際にも、 $W_T = 0.45$ 以上の場合には種々の角度より検討する必要がある。

W_N (後進), W_N (前進) - W_N (後進) および推力減少係数 t を (l_m/D) の横軸上に置点したものを Fig. 17 に示す。便宜的に W_N (後進) および W_N (前進) - W_N (後進) をそれぞれ W_p, W_f と考えれば、今回の実験では、 W_p も W_f も l_m に対して変化している。なお参考のために Tsakonas の回転楕円体に対する計算結果をも同図中に示した。回転楕円体の直後にプロペラ円盤をおいた場合とここで試験したような実用船型では、数値的に大きな開きがあるのは当然であるが、船体とプロペラとのクリアランスが W_p あるいは t におよぼす影響の傾向は似ている。

船尾形状の特性を今回は l_m/D の形で表現してみたが、伴流についてはある程度説明ができるように思われるがさらによく船尾形状の特性をつかむために、より合理的な船尾形状表現法を今後検討してみたい。

Fig. 17 Relation between W_N or t and (l_m/D) (Full Load Condition)

8 結 び

尺度影響をも含んだ船尾形状変化の推進性能に及ぼす影響をしらべるために行なわれた一連の試験研究であるが、結果的には今後この種の研究に関してより一層詳細に検討すべき個々の問題点の提起という形をとらざるをえなかった。

個々の問題点を解決するためには、理論的解明は勿論であるが、高度な実験技術が必要とし、当船研推進性能部においてもそういった研究課題の方向に進みつつある。

本研究は巨大船の推進性能に関する特別研究の一環として行なわれたもので、船研推進性能部業務課の職員全員の努力によって完成されたといつても過言ではない。ここに深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 谷口, 田村: On the Blockage Effect, Mitsubishi Shipbuilding and Engineering Co., Nagasaki, Experiment Tank, Report No. 307 (1958)
- 2) 田崎外: 水槽試験法に関する研究 (第1報), 第12回船研研究発表会 (昭和43年)

- 3) 横尾 : Scale Effect Experiments on Some Ship Form, 造船協会論文集, 第 106 号 (昭和 35 年)
 - 4) 谷口 : Study on Scale Effect of Propulsive Performance by Use of Geosims of a Tanker, 造船協会論文集, 第 120 号 (昭和 41 年)
 - 5) 馬場 : A New Component of Viscous Resistance of Ships, 造船学会論文集, 第 125 号 (昭和 44 年)
 - 6) 中武 : 自航推進性能の尺度影響について, 造船学会論文集, 第 125 号 (昭和 44 年)
 - 7) Tsakonas, Jacobs : Potential and Viscous Parts of the Thrust Deduction and Wake Fraction for an Ellipsoid of Revolution, S.I.T., R-770 (1960)
 - 8) 高橋外 : 船尾バルブ形状変化の推進性能におよぼす影響, 第 12 回船研研究発表会 (昭和 43 年)
 - 9) Lindgren, Johnsson : The Correlation of Ship Power and Revolutions with Model Test Results, S.S.P.A., Nr. 46 (1960)
 - 10) 渡辺外 : 肥大船の自航試験に現われる不安定現象について, 造船学会論文集, 第 126 号 (昭和 44 年)
-