

# 随想・造波抵抗論議あれこれ

Kシニア 塙 友雄

－はじめに－

－造波抵抗は 100 年前の昔に較べどれだけ減少したか－

- 1 タイタニック号資料をみて思いつく
- 2 航洋船 年代別、L/B 値（船長/幅 比）の変遷
- 3 タイタニック号と現世代船の比較（基準船 B のデータ使用）
- 4 クインメリー号と現世代船の比較（基準船 A のデータ使用）
- 5 計算基準船、適格度の検証（現存トップレベル船と比較）
- 6 まとめ

－高フルード船（ $F_n=0.3-0.45$ ）船型設計コンセプト－

- 1 はじめに
- 2 航海  $F_n=0.30-0.35$  の船型（ $C_b=0.52$ 、 $Lwl/B=5.7$  程度の船）  
－ $C_p$ =約 0.6（極小造波抵抗船型より大きめ）を推奨する－
- 3 航海  $F_n=0.35-0.40$  の船型（ $C_b=0.52$ 、 $Lwl/B=5.7$  程度の船）  
－船体中央船底を凹入させ、所要馬力を減らす船型－  
（関西造船協会誌 216 号（1991）掲載、関西造船協会賞受賞）
- 4 航海  $F_n=0.40-0.45$  の船型（ $C_b=0.52$ 、 $Lwl/B=5.7$  程度の船）  
－船体中央船底で波を起こし、所要馬力を減らす船型－  
（関西造船協会誌 226 号（1996）掲載）
  - 4.1 造波抵抗係数の内訳（参考）
  - 4.2 球状船首の効用（参考）
  - 4.3 船体中央船底で波を起こす船型（ $F_n=0.38-0.42$ 、所要馬力 30%減少）
  - 4.4 船型開発プロジェクトチーム（参考）
- 5 くれない丸球状船首実船試験（造波抵抗研究発展の導火線）
- 6 船底凹入“太古”と従来船の波形比較（ $F_n=0.38$  でも波静か）
- 7 2 軸船の船尾形状各種（参考）

－中速船（ $F_n=0.27-0.18$ ）船型設計コンセプト－

－おわりに－

## ーはじめにー

保存委員会、「乾先生のウェーブレスハルフォーム」のことで、内藤先生にお会いし、また藤村さんとメール交信しました。それで、忘れていた昔が懐かしく蘇りました。下川さん、大野道夫さん、間野さんが多くの回顧談を投稿され、間野さん、岡本さんから、「古いお話し」を残すよう薦められており、私も何か書こうと云う気になりましたが、「我田引水」「唯我独尊」にならないかと案じ、気が進まないままに日が過ぎました。私の経験談と云えば、やはり、「くれない丸球状船首実船試験」を契機に始まった船型設計の事柄が蘇ります。思案の末、やっと次の2点を選びました。一つ目は、造波抵抗は100年前の昔(タイタニック時代)に較べどれだけ減少したかと云うこと。10年前、旧Kシニアで、タイタニックを調査した時、船台上の同船写真や、入手した船体正面線図を眺めて、推進抵抗性能を推定してみたいと思いましたが、面倒なので止めました。今回またそれらを引出し、「若返りのトレーニング」を兼ねて推定計算を試みました。よそにない内容ですから、これを述べます。二つ目は、「フルード数0.3以上、数多くの高速船、設計経験からえたノウハウ」です。併せて「中速船の船型設計コンセプト」も述べます。随想と云うより、堅い論説に属するようなものなので、専門分野以外の方には興味薄い内容です。けれども、これまで、公表文献が少ない分野であり、そして、経験の積重ねから導かれ、自身が納得するコンセプトです(数字の説明ではありません)。現役の人も読むものと考え、あえて書き残します。

追記：最近、各社の設計プログラムも完成度が高まり、新造船の船体線図作成も殆ど自動化されています。設計の省力化はよいのですが、人と機械が互角に主役を務めるのではなく、機械だけが主役になるのではないかと懸念します。推進抵抗性能は Strength、Stability、Speed、造船設計3S部門の一部門、造船技術革新の歴史を担ってきた重要部門です。相矛盾する3部門間を最適にコンプロマイズし、最優秀船を生み出すことこそ、船舶基本設計(シンセシス)の真髄です。安全(適正強度、高復原性、高耐航性、高操縦性)、経済性(DW増大、スペース増、工作容易化、資材軽量化、幅広短小化、船価低減)、性能革新(重量軽減、省エネルギー、スピードアップ、高機能化、地球環境保護)等の複雑な諸事情の狭間に立って、シンセシスを成功させるためには、電算機でなく、人間の「スピリット」、柔軟な「決断能力」が必要です。船型設計はシンセシスの最たるものです。設計者の「スピリット」の育成が、今後の課題だと思います。造船工業から撤退した北欧で、世界最大、ユニークで近代的なクルーズ客船が続々と、しかも、生き活きと誕生しているのは、電算プログラム、生産システムだけのお陰でなく、船を造る彼等の心に、パイキング時代の「スピリット」、「伝統文化への誇り」が宿っているからだと思います。日本は20世紀後半、一連の造船技術の革新を成し遂げました。そのように、「スピリット」の持主です。これからの若い人達が、本文を単なる個人的な技術情報に留めず、産学共同で達成された「日本造船技術革新の歴史」の一部分と解釈し、今後の造船発展に資して貰えば幸いです。

# 一 造波抵抗は百年前の昔に較べどれだけ減少したか一

## 1 タイタニック号資料をみて思いつく

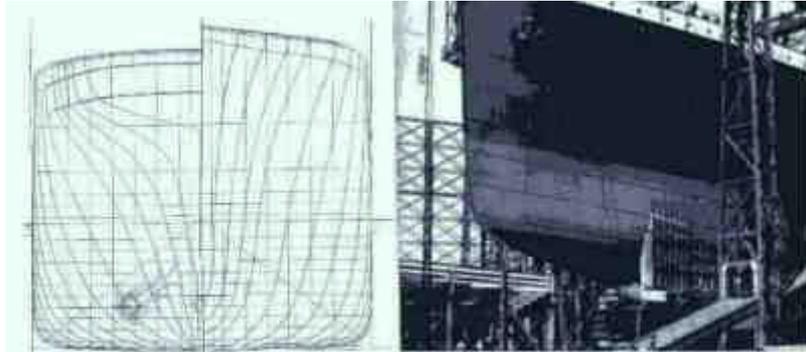


Fig. 1 タイタニック号の船体正面線図と進水直前の写真

10 年程前、旧 K シニアでタイタニック号の特集があった。キャメロン監督の映画タイタニックが流行っていた。街中の書店にタイタニック関係の書籍が沢山置かれていて、2-3 冊買い求めて、上掲(Fig. 1)の図面と写真に引付けられた。船首は典型的 U 型肋骨線形状、きつい凹入もなく、球状船首はないが、直線的で素直な水線形状、美しいと思った。ひょっとしたら、現在の船のように低抵抗なのではないかと思った。ボディプランから横断面積曲線を作成しようと考えたが面倒なのでやめた。今回、再びタイタニックの書籍を引っ張り出してみると、竣工時の公試運転の状況や、処女航海時の主機負荷と船速の関係が記載してある。六分儀と時計で図った航海記録である。それによると、タイタニックの公試運転では、最高速力テストは実施されなかったようである。当時は、工事が遅れ、また第二次産業革命の弊害による大衆の生活苦から、大規模な炭坑ストライキが続いていた。アイルランドの石炭は枯渇し、公試運転の石炭もホワイトライン社の他船から分けて貰ったようであった。最高速力を出すには 26 基のボイラーを炊かねばならず、船速が 22 ノットを越えたところで、計画どおりの成績は達成したとして、試験は打切られた。



Fig. 2 タイタニック号 速力-馬力推定



Fig. 3.1 計算に用いた基準船A、「やせ型極小造波船型」の水槽試験写真  $C_b=0.52$  フルード数  $Fn=0.29$

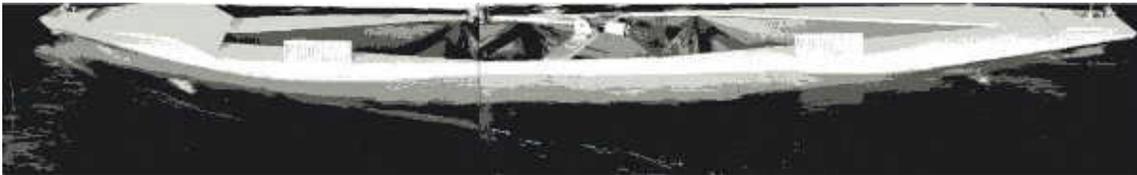


Fig. 3.2 計算に用いた基準船B、「中速肥型船型」の水槽試験写真  $C_b=0.75$  フルード数  $Fn=0.22$

注) 上掲の基準船のデータを物差しに使い、タイタニックその外の諸船の性能の推定計算を行った。

具体的な速力は処女航海において、事故が起きる前に確認された。処女航海は第1日、クインズタウンでの2.5時間の停泊を除いて、主機70回転(78%MC0)で464マイル、21.6ノット、第2日に主機72回転(85%MC0)で515マイル、21.5ノット(少し回転が高過ぎる)、さらに第3日の24時間に主機75回転(96%MC0)で546マイル、22.75ノットを記録し、第4日23時40分に冰山に衝突した。4日目は朝から無線による冰山情報が相次いで入電、操舵室は緊急状態にあったのであろう。正午に行われる六分儀による天測結果が記録されていない。冰山衝突時の船速は、もしかしたら22ノットを越えていたかも知れない。タイタニックが残した最高速力は航海3日目の22.75ノット、無理をして速く航走したようであり、乗船中の船会社イズメイ社長が宣伝のため高速力を出すように、スミス船長に圧力をかけたのではないかと云われている。今回、以上の記録を頼りにタイタニックの航海速力を推定したのが、Fig.2である。図にみられるように、航海速力は32,700馬力(71%MC0)の出力で公称どおり21ノットであったようだ。因みに公試運転の速力も推定した。最大速力は23.5ノットだったようである。航海排水量は文献によると軽荷重量が46,330トン、燃料消費が680トン/日であった。石炭不足時代、燃料は片航海分積載だった思うので航海排水量を54,500トンと仮定した。このように、航海時の馬力、速力、排水量が特定されると、割合に容易に摩擦抵抗値・剰余抵抗値を計算できることに気付いた。まず、航海フルード数、肥瘦度がタイタニックに類似した基準船B(Fig.3.2)を選び、その水槽試験資料を基に、主要目をタイタニックと同じにして、速力馬力を計算すると、現在版タイタニックの性能内訳ができあがる。次に、その剰余抵抗係数に1から2程度までの係数を掛け抵抗が大きくなるように計らい、係数値を順次上げてシミュレーションし、所要馬力がタイタニックと同値になるところで止める。そうすると、これがタイタニックの性能で、現在版性能と優劣を較べることができる。この計算結果を後述の3,4,5で説明する。

## 2 航洋船 年代別、L/B 値(船長/幅 比)の変遷

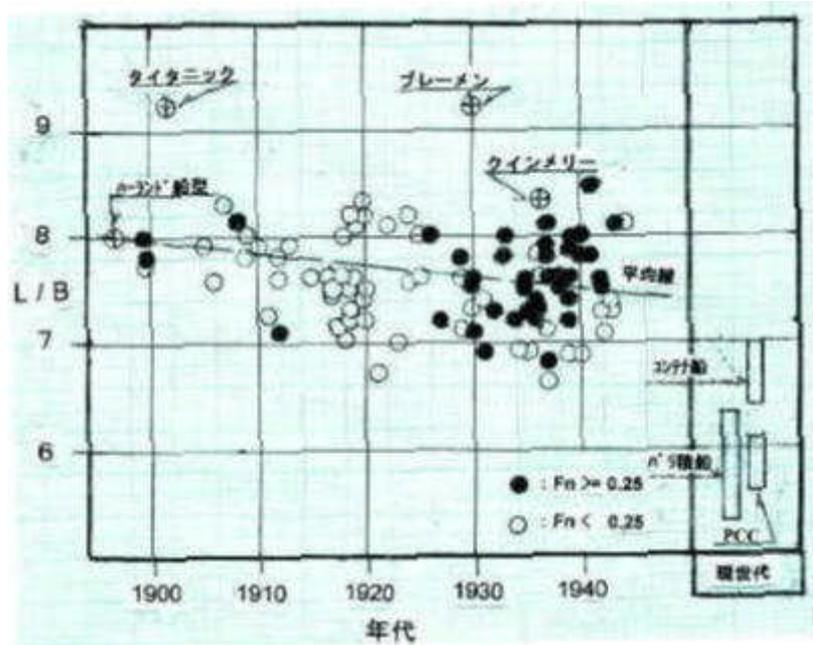


Fig. 4 航洋船 年代別、L/B の変遷 (長さ 100m 以下の船は内航船とし、除外)

日本では幕末、坂本龍馬の時代、1862年、北アイルランドのベルファストにハーランド・アンド・ウォルフ造船所ができた。社長であり資本家のハーランドは天才的な技能の持主で、帆船から汽船に移行する時代の流れに乗って、大胆な技術革新を行った。汽船に不要な、帆走用のバウスプリット、ジブブーム、船首像、策具すべてを取り払い、垂直な船首材を設けた。木製の上甲板を鉄製にして頑丈な船とし、船体のビルジをボックス型にして積載量を増やし、長いビルジキールを付けて横揺れを防いだ。L/B=8位の細長船として抵抗を減らし、主機の馬力アップをせずに速力を速めた。当時、木造帆船も、また建造されていた。汽船もよいが、やはり、省エネルギーを好む船主もいたのである。クリッパー船、カテイサーク号の船体寸法は 86m(全長)x 11m(幅)である。L/B=7.5程度と他の帆船に比し細長に仕立てられている、造波抵抗が未だ明らかにされていない時代であったが、細長くした方が走りやすく、また余り細長過ぎると、造り難く、取扱い難いことが、生活の知恵で、わかっていた。カテイサークは、優れた抵抗性能により、20ノット(フルード数  $Fn=0.33$ )を出したと云われる。それより速くならなかったのは、造波抵抗の壁にぶつかったからであろう。話を元へ戻す。ハーランド船が出来てからも、L/B=8の船が標準であったが、年代が進むと、L/Bの値は8から、7.5の方へ、少しずつ下げられた。Fig. 4にその傾向が示されている。大西洋定期客船航路は国家の威信をかけた各国の速力競争の場であった。L/B=9.2-8.3の細長船が造られた。戦艦大和は 263m(Loa) x 38.9m(B) x 10.86m(d)、64,000トン(排水量)、でL/B=6.4と小さく造波抵抗が大きかった。それは口径46cmの巨砲搭載のためで、発射時の復原性を保つため、大きな幅が必要で、L/Bが小さくなってしまった。造波

抵抗増大を防ぐため、始めて球状船首が付けられた。水槽試験を頼りに開発されたと思うが、その効果は不明、やはり、他艦より燃料消費が大きく、戦時下の重油不足時代には、大きな燃料消費に苦しんだと聞いている。当時は造波抵抗に関しては、ミッチェル、ハブロックの論文があるものの、未だ理論研究がなされていない時代であった。

さて、現世代に話しを移す。Fig.4 のとおり、コンテナ船は  $L/B=7.0-6.4$ 、PCC は  $L/B=6.1-5.6$ 、バラ積み船(タンカー、バルク、鉱石、石炭、LNG)は  $L/B=6.35-5.3$  と格段に太短くなった。造波抵抗理論を応用して抵抗が減ったからこそ、これができたものと思う。オイルショック以来、コンテナ船も 25 ノット位まで減速し、また、巨大化し船の長さも大きくなり、航海フルード数は 0.23-0.24 (中速域) まで落ちた。

高度成長期に、業界・学会あげて取組んだ  $F_n=0.28$  の船型、やせ型高速船型は航洋船としては、造る必要がなくなった。速く走る代わりに、幅広短小とし、 $C_b$  を大きくする、つまり、船価低減、取扱いハンデ化、積載量を増大化する方へ造波抵抗低減の利得を使うようになった。ただ、コンテナ船、クルーズ客船は、結構、細長船である。細長船は客室やコンテナの配置が楽なので、 $L/B=6.4-7.0$  と一般船より大き目の値が使われている。

### 3 タイタニック号と現世代船の比較(基準船 B のデータ使用)

項目	①欄 タイタニック号		②欄 同長広幅船型	
	原型	現世代船型に変更		
状態	航海状態	航海状態	航海状態	
Lwl x B x D (m)	260 x 28.2 x 9.8	"	260 x 44 x 11.2	
L/B	9.2	"	5.9	
排水量 (t)	54,501	"	89,305	64%増
船速 (kts) フルード数 $F_n$	21 0.214	"	21 0.214	
主機 (MCO)	46,000ps (33,810kw)	31,000ps (22,785kw)	43,700ps (32,120kw) 5%減	
種類	R,T 3軸	ディーゼル 1軸	ディーゼル 1軸	
所要馬力	32,703ps (71%MCO)	23,295ps (71%MCO) 剰余抵抗38%減 馬力29%減	32,643ps (75%MCO) タイタニックと馬力は同一 広幅化し 排水量増加	
浸水面積 (m <sup>2</sup> )	10,600	"	13,786	
( $\delta$ cF 2次元修正)		原型より	原型より	
摩擦抵抗係数 rF	3.864E-03	3.676E-03 5%減	3.378E-03	12%減
剰余抵抗係数 rR	5.114E-03	3.148E-03 38%減	3.492E-03	32%減
全抵抗係数 rT	8.978E-03	6.824E-03 24%減	6.870E-03	23%減
推進効率 $\eta$	0.681	0.728 7%改善	0.729	5%改善

Table 1 タイタニックと現世代船型 抵抗推進性能 推定計算結果

基準船 B (Fig. 3.2) を使って、抵抗推進性能を推定し、Table 1 に示す。摩擦抵抗係数はシエンヘル、デルタ CF (2次元) の値は関西造船協会、造船設計便覧記載どおりとした。タイタニックの剰余抵抗係数は、摩擦抵抗係数より大きいですが、全抵抗係数は  $10E-03$  より低くなり、100年前の船としては、まずまずの性能と思う。ウィリアムフルードが水槽試験を始

めてから 40 年、かかる短年月間に船型学を築き上げた英国の力は凄いものだと思う。現世代船に書き直した性能をみると、剰余抵抗が 38%減(造波抵抗減少は約 50%減と思う)、これが近代設計の成果である。乾先生が云われる、「船の造波は船首が 60%、船尾が 40%」と云う説に従えば、船首造波が約 80%減少したと考えられ、大した成果である。摩擦抵抗係数は 5%減となっているが銲接と溶接の差を修正したものである。推進効率、タイタニックは 3 軸、現世代船は 2 軸で 7%効率改善であるが、最近の高効率プロペラのことは考慮に入っていない。馬力低下は表によると 29%減、船体形状の変化で 100 年間に馬力が約 30%低下したと云う結果である。100 年間で最も進歩したのは主機であろう。レシプロ、タービン、高圧タービン、燃料が石炭から重油へと進み、タイタニック時代、3 軸、4 軸を使っていたものが、今は 90,000 馬力、1 軸のコンテナ船が走っている。Table 1②欄は、参考のために、タイタニック型を L/B=5.9 まで太短くし、また、同一馬力になるよう排水量を増やした場合の抵抗内訳を求めたものである。剰余抵抗は増えるどころか昔型(タイタニック型)より 32%減少し、摩擦抵抗も 12%減り、排水量は 64%増で、所要馬力は同じである。つまり、造波抵抗研究のお陰で、L/B を小さくしても馬力アップが無く、積荷が増えることが、計算に現れたのである。今後、L/B をさらに小さくして、摩擦抵抗もさらに減らすべく、ますます太短くなるのではないだろうか。

#### 4 クインメリー号と現世代船の比較 (基準船 A のデータ使用)

項目	③欄 クインメリー号		④欄 90,000DW型 LNG
	原型(1936年)	現世代船型に変更	実在
状態	航海状態		航海状態
Lwl x B x D (m)	301 x 36.1 x 11.9	同左	282 x 46.6 x 12.4
L/B	8.3	同左	6.0
排水量 (t)	72,743	同左	114,510
船速(kts) フルード数Fn	28.5 0.27	同左	19.0 0.185
主機 (MCO) 種類	160,000ps(117,600kw) 高圧タービン 4軸	112,000ps (82,320kw) ディーゼル 1軸	33,300ps(24,500kw) ディーゼル 1軸 実搭載主機と同出力
所要馬力	111,800ps(70%MCO)	78,050ps(70%MCO) 剰余41%減 馬力30%減	25,980ps(78%MCO)
浸水面積 (m <sup>2</sup> )	13,058	13,058	16,048
(delt cF 2次元修正)		原型より	
摩擦抵抗係数 rF	3.407E-03	3.270E-03 4%減	3.437E-03
剰余抵抗係数 rR	5.933E-03	3.494E-03 41%減	3.018E-03
全抵抗係数 rT	9.340E-03	6.764E-03 28%減	6.455E-03
推進効率 eta	0.629	0.653 4%改善	0.751

Table 2 クインメリーと現世代船型 抵抗推進性能 推定計算

Table 2 ③欄 は基準船 A(Fig. 3.1)を使い、クインメリーについて推定計算を行ったものである。計算結果、現世代船はクインメリーに比し、剰余抵抗係数は 41%減、馬力は 30%減となった。クインメリーの性能はタイタニックと同程度のものであった。クインメリーは航海フルード数 0.27、速力 28.5 ノット (実航海では 29-30 ノットを出したと云う。)

## 5 計算基準船、適格度の検証（現存トップレベル船と比較）

項目	⑤ 8,110TEUコンテナ	⑥ 欄 5400台 PCC	⑦ 欄 高速フェリー
	実在	同左	同左
状態	航海状態	同左	同左
Lwl x B x D (m)	308 x 45.6 x 14.5	195 x 32.26 x 10.3	159 x 27 x 6
L/B	6.8	6.0	5.9
排水量 (t)	118,711	33,650	13,100
船速(kts) フルート数Fn	25.25 0.24	20 0.235	23.2 0.30
主機 (MCO)	85,600ps (62,910kw)	21,100ps (15,500kw)	24,500ps (18,000kw)
種類	ディーゼル 1軸 実搭載主機と同出力	ディーゼル 1軸 実搭載主機と同出力	ディーゼル 1軸 実搭載主機と同出力
所要馬力	60,842ps(71%MCO)	15,631ps(74%MCO)	18,335ps(75%MCO)
浸水面積 (m <sup>2</sup> )	16,881	7,161	4,164
(deit cF 2次元修正)			
摩擦抵抗係数 rF	3.231E-03	4.627E-03	5.465E-03
剰余抵抗係数 rR	2.051E-03	2.150E-03	4.469E-03
全抵抗係数 rT	5.282E-03	6.777E-03	9.934E-03
推進効率 eta	0.631	0.675	0.702(CRP)

Table 3 現存代表船の速力ー馬力試算

基準船 A (Fig. 3.1)、基準船 B (Fig. 3.2) で、クインメリー号、タイタニック号の性能を推定したが、この基準船が果たして、現世代を代表するかどうか、検証する必要がある。そこで、現在を代表する船として日本船舶海洋工学会誌、KANRIN 19 号に掲載されている船から 5 隻を選び、基準船のデータを使用して速力ー馬力計算を行った。基準船 A (最適 Fn=0.29) は 8,110TEU コンテナ船、5,400 台積み PCC、高速フェリーの 3 隻、基準船 B (最適 FN=0.22) で 90,000DW LNG 船の主機所要馬力を計算した。その結果を Table 2 ④欄と Table 3 ⑤、⑥、⑦欄に示す。偶然と思えるように、全隻の計算所要馬力は実際の搭載主機馬力に一致した。従って、2つの基準船の性能は、正しく現在のトップレベルにあると検証できる。基準船の 2 隻は、共に 30 年前の技術レベルによって、20 年前に建造された。現在のトップレベル船は 30 年前に開発された技術に支えられている。

## 6 まとめ

19 世紀後半、第二次産業革命の影響を受け、急速に発達した船舶は、速く走るために、当初 L/B=8 位の細長船で、第一次大戦、第二次大戦を経た後も、L/B=7.5 位の細長を踏襲してきた。19 世紀末と 20 世紀初に発表された、ミッチェル、ハブロックの線形造波抵抗理論は暫くそのまま眠っていたが、1960 年代からこれを用いた造波抵抗研究が、多くの研究者の熱意により、一斉に花開き、1980 年までの 20 年間に造波抵抗減少設計が全世界に普及した。世界中の殆どの船が球状船首を取付け、船体前部は造波抵抗理論に従う形となり、その成果は、昔に比し、船の剰余抵抗を約 40%減らし、所要馬力を約 30%節減した。造波抵抗が減少するようになってから、高速コンテナ船を除き、L/B=8 から L/B=6 前後まで。船は幅

広短小化し、建造し易く、運航取扱いがハンデイになった。経済の進展に伴い、船体巨大化が始まり、航海フルード数は以前より低下し、造波抵抗問題は楽になった。船舶摩擦抵抗上からは、太短い船の方が有利である。今後は、肥大化、幅広短小化が、いっそう促進されるものと思われる。他方、内航フェリー、R0/R0、客船、漁船等は港湾事情等の影響で、船の大きさに制限を受ける。そして、世のスピードアップ志向から、高フルード数の船がますます要求されるようになった。この分野では、造波抵抗理論応用の船型改良の余地がまだまだのこされている。(次頁、－ 高フルード数( $F_n=0.3-0.45$ ) 船型設計コンセプト－参照)

以上で、造波抵抗減少成果は、スピードアップ、省エネルギーに留まらず、船の幅広短小化、肥大化を促進し、船価低減、運航ハンデイ化、DW、貨物容積、スペース増大化等、経済成長面で大きく貢献していることを明らかにできたと思う。

－造波抵抗は 100 年前の昔に較べどれだけ減少したか－

2010 年 7 月下旬

－完－

## －高フルード数 ( $F_n=0.3-0.45$ ) 船型設計コンセプト－

### 1 はじめに

航洋コンテナ船は巨大化し、航海フルード数は 0.24 まで下った。PCC についても同様である。造船界における造波抵抗への関心は薄れ、主力造船所、研究所、大学等の造波抵抗減少研究は CFD の研究を除いて、衰えてきたようだ。航海フルード数が 0.3 を越す航洋船はもはや出現しそうもない。それ以下の速力の船型なら、既に豊富なデータが揃っており、新たな知見は不要である。けれども、内航の中小型フェリー、客船、それに漁船ではそうは行かない。高速道路の拡充、世のスピードアップ志向につられて、要求される船速はフルード数の忌避領域、つまり  $F_n=0.3-0.35$  に突入してしまった。中小造船所では、これらの船を多数建造し、多くのノウハウを有していると思われるが、これらは公表されていない。日本中型造船工業会、かつての船舶整備公団、船舶技術研究所等から公表された文献をみても、従来の最適  $F_n=0.28$  時代の船、いわゆる「やせ型高速船」のコンセプトが普遍化して残っており、新しい船を開発する資料としては物足りない。筆者は 2005 年まで、フルード数が 0.30 以上の船型設計に関わってきた。経験を通じて身についた思考を披露する。

航海フルード数が 0.28 以下の船は、類似船の横断面積曲線(以下  $C_p$  曲線と云う)に造波抵抗理論に基づく修正を加えれば、それだけで十分に性能が改善された。けれども、航海フルード数  $F_n$  が 0.30 を越える船では、船体表面の正負の圧力分布変化が激しくなり、それが船体周りの流れを乱し、船体を沈下させ、肋骨線傾斜の抵抗をより増大させる。折角の  $C_p$  曲線最適化の効果が台無しにされる。その対策のため、船体形状全般の見直しが必要になる。 $C_p$  曲線の船首部形状だけの修正では所要馬力は数%程度しか減らない。船体沈下を抑え、肋骨線形状による非線形造波をなくする対策を行って初めて、20%程度の馬力減少がえられる。かなりの度数の経験を経たので、数値を交えて、設計上重要なノウハウを具体的に述べる。

有限喫水極小造波抵抗理論、最適  $C_p$  曲線(丸尾、山越、1971 年)を非線形修正なしでそのまま使用する。非線形修正をすると  $C_p$  値が小さくなり総合的に不都合が生じる。(この事柄は水槽試験で確認済み。) また、他の理論設計法を使っても結果的に同じ  $C_p$  曲線がえられる。従来型のデータを使う統計解析法は現状ではデータ不備のため、航海フルード数が 0.3 以上の船には適さないと思う。よい結果がえられないから使用しない方がよい。

### 2 航海 $F_n=0.30-0.35$ の船型 ( $C_b=0.52$ 、 $L_{wl}/B=5.7$ 程度の船)

#### － $C_p=$ 約 0.6 (極小造波抵抗船型より大きめ) を推奨する－

$C_p$  値を約 0.6 とし、浮心の位置を約  $1\%L_{ppA}$  とする。このように、 $C_p$  値を今までより大きくし、かなり大きく浮心の位置を前方へ移すのは、船体周り負圧抑制と前部肋骨線の U

型化を行い易くするためである。Cp 値をこれより大きくすると、抵抗曲線にセカンドハンブが生じる恐れがある。これより小さくすると、船体がやせて、負圧抑制、前部肋骨線 U 型化が物理的にやり難くなる。

**船尾沈下抑制策** 上記の Cp=約 0.6、浮心位置=約 1%LppA を実行する他に、後部肋骨線を必ず V 型とする(船体負圧減少、大径プロペラ採用可能のため)。さらに、船尾部水線幅を拡げて、大きな上部船体の予備浮力で沈下を防ぐ。浮面心は後方へ移動させる。L/B<5.5 になると、非線形造波抵抗が急増するから、船尾端長さ(AP-AE)を長くする (4-7%Lpp にする)。V 型後部肋骨線と云うのは、2 軸船であっても 1 軸船のような形状、バトックフローの主船体にスケグを組合せたような形状のことである。Fig.6 の Taylor 船型のような U 型 は船体周り負圧を増大させるから、採用しない。

**非線形造波対策** 水線面積の前半部を小さくする。大きな前部 Cp(CpF)値と相俟って、前部肋骨線は必然的に U 型となる。これによりかなりの非線形造波を防ぐことができる。球状船首の突出値は 3%Lpp。L/B<5.5 の場合は船体波紋が理論より前方へずれる量がさらに大きくなるので、これに対応して突出値を 4-6%Lpp の範囲で増加させる。

### 3 航海 Fn=0.35-0.40 の船 (Cb=0.52、Lwl/B=5.7 程度の船)

#### — 船体中央船底を凹入させ、所要馬力を減らす船型 —

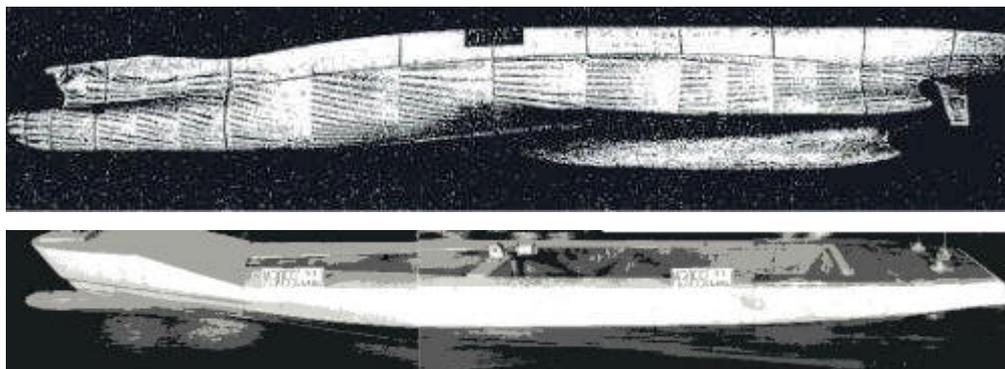


Fig. 5.1 最適船型の例 1 太古型 負圧が減り船側水位は水平。造波僅少な様が明瞭 Fn=0.35

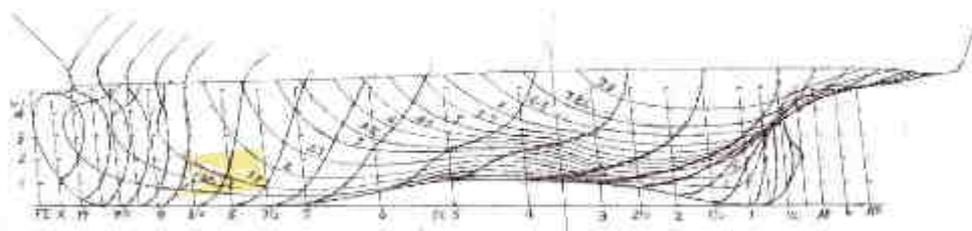


Fig. 5.2 最適船型の例 2(研究船) 1 軸船の例 船側を削るのでは船体周り負圧減少せず

航海フルード数が  $Fn=0.35-0.40$  の速度領域では、 $C_p$  値を  $0.65-0.67$  とする。勿論、極小造波  $C_p$  曲線を採用する。計画フルード数において、造波抵抗係数曲線にホロー(凹入)形状ができる。よい現象である。 $C_p$  値をこれ以上増すと抵抗が急増して良くない。フェリーは、一般に方形係数が  $C_b=0.52$  程度と小さいから、 $C_p$  値が  $0.67$  では、 $C_m$  値が  $0.78$  と過小になり、船型が成立しなくなる。けれども、「こんな  $C_p$  曲線は非現実的で使えない」と考えて計画を放棄してはならない。「船体中央部負圧を緩和するため、中央断面を小さくする」は造波抵抗理論の示唆で、従来船のように大きな中央横断面を採用すると、船体周りの水面は、船体中央部を中心に蟻地獄のようにくぼみ、船体中央部船側水位は、大きく凹む。これにより非線形造波が強くなる。フェリー太古では、Fig.5.1 のように、船体中央部の船底を凹ませて断面積を減らした。船側を削り取って断面積を減らすのは効果的でなかった。Fig.5.2 は、1軸船の場合の最適船型の略図である。さて、浮心の位置は、前記より、さらに前方へ移動し、 $L_{cb}=0.5-0\%L_{ppA}$  とする。こうすれば、前部肋骨線は文句なく U 型になる。船首バルブの大きさは、中央横断面積の約 20%(FP) がよい。中央横断面積が小さいからそれほど違和感はない。船首バルブ突出値、船尾端長さは、前記の場合と同様にする。巨大バルブは船首沈下が生じる。船首バルブの断面形状を倒立卵形にすると、船首沈下が抑えられる。巨大バルブは、迎え波中、アンチピッチングに効果的である。10 年程前、欧州設計の高速ヨット、マリンの水槽試験テスト結果を本文の船型と比較した。この船は  $C_p=0.63$ 、最適  $Fn=0.35$  の極小造波型そのものであったけれども、 $L_{cb}$  は  $3\%L_{ppA}$  とやせ型高速船並みに後方に在り、後部肋骨線は Taylor 船型(Fig.6)と同じく U 型であった。欧州では、高速船と云えば、未だ Taylor 船型のイメージが生きているようである。筆者らの最適船型より 10%程度、性能がよくないことが解り、「 $C_p$  曲線のみ極小造波型とし、他は従来のタイプシップに頼る設計」は好ましくないことが証明された。

次に本文で述べた最適船型の主要寸法比の数値の実例を次に示す。 $C_b=0.52, L_{wl}/B=5.7$   
 最適主要寸法比の例 (1)  $Fn=0.30-0.35$   $C_p=0.600$   $C_pF=0.560$   $C_pA=0.640$   
 $L_{cb}=1\%L_{ppA}$   $C_w=0.77$   $C_wF=0.620$   $C_wA=0.920$

(2)  $Fn=0.35-0.40$   $C_p=0.670$   $C_pF=0.640$   $C_pA=0.700$   
 $L_{cb}=0.4\%L_{ppA}$   $C_w=0.77$   $C_wF=0.62$   $C_wA=0.92$

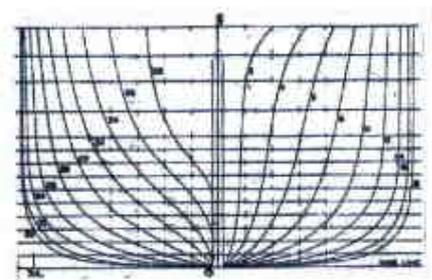


Fig. 6 Taylor 船型 船体正面線図 後半部の肋骨線形状は U 型で、高速では沈下大きく不良

## 4 航海 $Fn=0.40-0.45$ の船 ( $C_b=0.52$ 、 $L_{wl}/B=5.7$ 程度の船)

### — 船体中央船底で波を起こし、所要馬力を減らす船型 —

航海フルード数が 0.4 を越すと、造波抵抗のラストハンプが始まる。最早、どのように細工しても高馬力を避けることが出来ない。この速度領域では、波長が船の長さを越え、船首尾波は船の後方で重畳し合っ大抵抗を生じる。小型漁船、作業船、その他の特殊船は少々主機が大馬力になっても、これを乗越えるものもあるが、 $Fn=0.42$  位が、どうやら排水量型船の速力の限界であると思う。軽合金製の軽載荷重量船、半排水量型船等は、フルード数 0.43 あたりから、船底に動的浮力が作用して浮上を始め、ラストハンプを越えて、フルード数 0.7 付近で滑走状態になる。丸尾先生の最小抵抗双胴船「MRTH」（塩田さんが研究中）および半没水船（実船実績あり）は、共にウィングハルの  $L/B$  を十分に細長化して造波を減らし、また双胴間隔を拡げて胴間波干渉を少なくし、排水量型船でありながら、大幅に抵抗を減らすタイプである。シングルハルの排水量型船に、極小造波  $C_p$  曲線を当てはめようとすると、 $C_p$  値は 0.75-0.80 になり、方形係数が小さい船は、今度こそ船型が成立しない。また、たとえ無理して、最適  $C_p$  曲線を得たとしても効果がない。抵抗を減らす唯一の手段は、増大する船尾沈下を抑えることで、そのために、船体中央部の船体表面負圧分布をどのように減らすかが、計画が成功するか、壊れるかの別れ道になる。ところで、航海フルード数が、 $Fn=0.4$  付近では、船が起こす船首尾波の波長は、船の長さにはほぼ等しくなる。船体中央船底に何らかの突起を設け、波を起こすと、船首尾波に逆位相に干渉して抵抗を減らすことができる可能性がある。以前から衆知の現象であるが、これにチャレンジして、ラストハンプ麓の抵抗を減らす新船型を開発した。今回はこの話しである。

### 4.1 造波抵抗係数の内訳(参考)

この新船型を説明する前に、船型分野以外の人達の理解を得るために、「造波抵抗係数」について説明する。滑らかな  $C_p$  曲線でも、曲線の各点から無数の微小波が発生する。それらは、船の真後ろから真横(角度 0 度から 90 度)迄、広がって互いに重畳し合い、良く知られている後続自由波(横波とケルビン波)を船体後方に残す。各々の方向へ放出される波を素成波と呼び、積分計算すると「波形造波抵抗係数」が求められる。積分項内の素成波の式を振幅関数と呼ぶ。水槽試験で後続自由波を計測し、それから各角度(真後ろ 0 度から真横 90 度まで)毎の振幅関数を計算により求めることができる。こうして求められる後続自由波の抵抗係数のことを「波形造波抵抗係数( $r_{Wp}$ )」と呼ぶ。一方、水槽試験の全抵抗計測値から相当する平板摩擦抵抗係数(日本ではシェンヘルの算式を使うことが多い)を差引いて求めた抵抗係数のことを「剰余抵抗係数( $r_R$ )」と称し、また、低速域の全抵抗計測値(造波現象がない)から摩擦抵抗形状影響成分( $k$  値)を判読し、「剰余抵抗係数( $r_R$ )」から摩擦抵抗形状影響成分を差引いて「造波抵抗係数( $r_W$ )」が求められる。この( $r_W$ )値と( $r_{Wp}$ )値は一

致しない。フルード数が 0.35 より低い低速では、 $(rW-rWp)$  値は  $(rW)$  値の 20-30%だが、フルード数が 0.35-0.40 と高くなると、太短い船では、 $(rW-rWp)$  値は  $(rW)$  値の 40%程度まで大きくなる。 $(rW-rWp)$  値に含まれる成分は次のとおりである。すなわち、中央水面の凹入、船体の沈下影響、波崩れ、砕波、不連続流、外板反射流、衝撃波、肋骨線傾斜影響等、粘性抵抗成分も含んだ諸々の非線形現象によって生じる各抵抗値の総和である。本文では、これを「非線形造波抵抗係数」と呼ぶことにする。(非線形造波抵抗係数について詳しい文献は見当たらない。航洋船ではこれは余り問題にならない)「造波抵抗係数」は「波形造波抵抗係数」と「非線形造波抵抗係数」の和である。太短い船、肥えた船で、この「非線形造波抵抗」が大きくなる。フェリー太古型の開発は、新しいコンセプトに従って、非線形造波抵抗を減らすことが目的であったが、水槽データを調べると、「非線形造波抵抗」と同時に「波形造波抵抗」も減少していた。真後ろおよび斜め後方向への振幅関数が減り、真横方向への振幅関数は増えていたが、総合的に「波形造波抵抗係数」は減少していた。船底の凹みの後側の曲面に不連続が生じて波が起こり、後続自由波に干渉して抵抗が減ったのであろう。この発見で、「船体中央部の波起こし船型」の開発へ向かって、弾みがついた。

## 4.2 球状船首の効用(参考)

造波抵抗係数のことを説明したついでに、余り文献に記載されていない球状船首の効用について、次に説明する。球状船首は、主船体の船首波を船首バルブの逆位相干渉によって減らすものと単純に考える人が多いが、それだけでなく、球状船首の効用はもっと広い。

線形造波抵抗理論では、球状船首を特異点と考え、主船体の吹き出し分布に付加するように扱うが、実際は球状船首と船首船体は一体化して、負圧と船首分岐正圧力が干渉し合っていて、総合的に船首部の圧力変動を和らげ、造波、非線形造波、砕波、渦、衝撃波等の発生を抑制するものである。

- (1) 船体前部造波に逆位相干渉し、造波抵抗をミニマイズする。衆知の効果である。  
極小造波  $C_p$  曲線採用の船型 ( $Fn=0.28$ ) では、主船体自体の波が減るから、球状船首も小型になる。薄型船首バルブと云われる。「やせ形高速船」で使用される。
- (2) 長く突出した球状船首で波を切り裂き、主船体船首砕波、首飾り渦等を減少させる。
- (3) 大型球状船首の負圧で、船首分岐正圧力のピーク値を下げ、船体表面圧力分布を均一化する。  
(2)(3) は、中低速、幅広肥型船、肥大船および  $Fn>0.35$  の高速船で使われる。
- (4) 球状船首の船首沈下により、船尾沈下を抑制し抵抗を減少させる。(  $Fn>0.35$  で重要)
- (5) 巨大突出球状船首でアンチピッチング作用を行う。(長く突出する傾斜船首材と相俟って波を挟み、船体を拘束する。)  $Fn>0.35$  の中小型、高速船、フェリー、漁船、半排水量型高速船で使われる。

### 4.3 船体中央船底で波を起こす ( $F_n=0.38-0.42$ 所要馬力 30%減少)

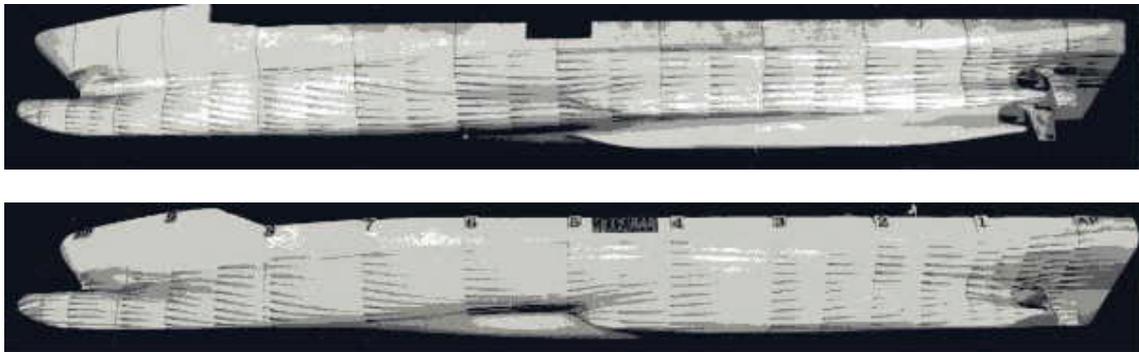


Fig. 7 船底凸出(特異点)で波を起こす船型 (上図 2軸 準三胴船 下図 1軸船) 有効  $F_n=0.38-0.42$



Fig. 8 前図 2軸 準三胴船の船側波形 中央部水線の凹入なく船側波は僅少  $F_n=0.45$

話が横道にそれたので、本筋に戻す。Fig. 7 は今回首題の船型 (2軸船および1軸船) の風変わりな水槽試験模型写真である。2軸船を準三胴船と名付けた。水槽試験は2m回流水槽試験、5m曳航水槽試験の両方が行なわれた。機関室配置、復原性に支障がないような、実船向きの船体線図が作られた。2軸準三胴船の所要馬力低減率は、通常船型( $C_p$  曲線は極小造波型)と比較して30%、太古型船底凹入型に比し17%であった。低減内容は、「波形造波抵抗値」、「非線形造波抵抗値」が共に減少し、効果的なフルード数範囲は  $F_n 0.39-0.42$  であった。Fig. 8 は準三胴船模型の船側波形の写真である。中央部船側波の凹入なく、排水量型船としては超高フルード数の  $F_n=0.45$  ながら、船側波もたいそう少ない。1軸船の場合の所要馬力低減率は2軸船と同じであった。通常船に比し、30%馬力が減少すると云うことは、 $L_{pp}=160m$ 、4000DW、 $L/B=6$  前後のフェリー、RO/RO 船が、市販の通常主機、を搭載して航海速度 30 ノット ( $F_n=0.40$ ) で航海できることを意味している。準三胴船の実船は未だ建造されていない。

注)「前回の船底凹入型フェリー太古 ( $L_{wl}=78m$ 、20 ノット、 $F_n=0.37$ ) は、船主が予定した主機馬力 10,000ps (推定に使った従来船の性能が昔のまま) が 7,000ps に減少。ほんとうに燃費が低いので、建造後 13 年目、一度、経年変化による性能低下を調査して欲しいと船主から造船所に依頼あり、実航海中の速力、馬力調査が行われた。新造時の性能そのままであった。船主監督、建造に携わった造船所関係者一同、再び「開発の喜び」を味わったのであった。」

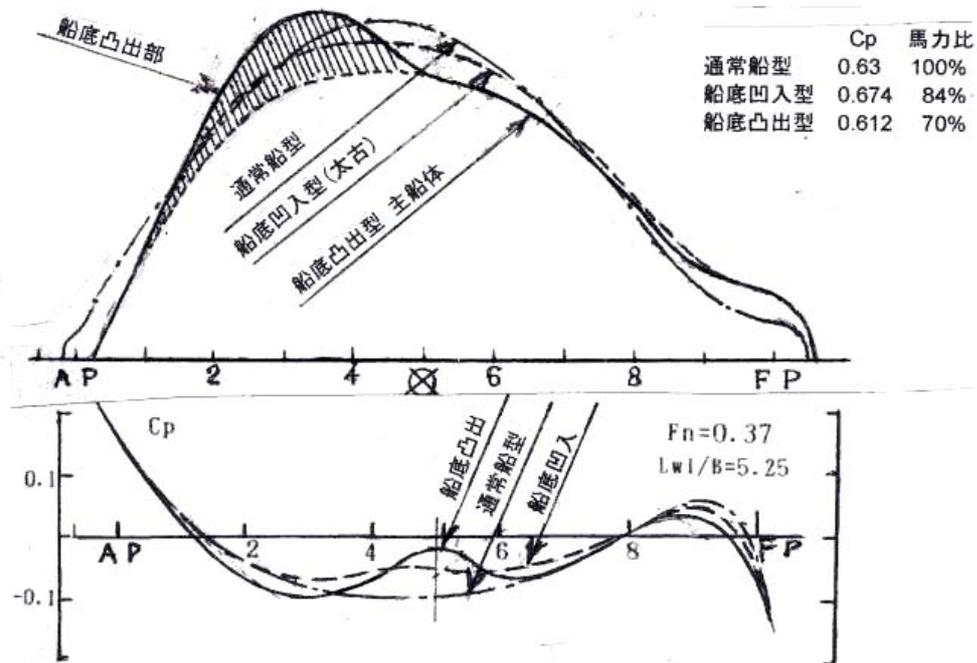


Fig. 9 上図 横断面積曲線の比較 下図 船体表面圧力係数分布曲線の比較

Fig. 9 に、通常船、船底凹入、船底凸出の各船型の横断面積曲線図(排水量の大きさを揃えるよう描いている)を比較した。同時に、Hess & Smith 法を用いて、各船型の船体表面圧力係数(Cp)分布曲線も併記した。船底凸出の Cp 曲線は親亀が子亀を背負ったような形である。この決め方は難しかった。船体中央部に膨らみを付けるだけでは、膨らみ後方、スクエア・ステーション 2-4 の間の負圧が却って増大し、性能がぶち壊される。図に斜線で示されるように、子亀の後側曲線は滑らかに船尾まで持って行かなければならない。子亀は親亀の足のさきまで重ねないと、計画は成功しない。また、船体中央部で波を起こすために、子亀の頭の膨らみを、どの位置にするかが難しく、最適解を得るために、模型の改造は 6 回程度、繰り返された。

下図の船体表面圧力係数分布曲線を見ると、通常船、船底凹入、船底凸出の順番で負圧分布面積は減り、造波抵抗の減少もそれに対応する。L/B が大きくなると、負圧分布は小さくなり、圧力分布曲線は均一化される。図には圧力分布変化が激しい L/B=5.25 の計算値が示されている。船側波形が負圧影響で凹入する位置は、フルード数が高くなる程、船体後方へ移動するようである。

図の圧力分布曲線を見る度に、開発当時も、そして今も「いるか」の姿を思い出す。「いるか」の側面は、腹は凹入し、長い口は巨大船首バルブのように、その負圧分布で、頭部の分岐正圧力を緩和する。「いるか」の尻尾は、やせ型で負圧分布を起こさない。魚でないから、身体が沈み過ぎないように、また、泳ぎ易いように。自然の摂理は最適形状を「いるか」に与えたのではないだろうか。くびれた腹と、その背中にある鰭は、船体中央部凸出船と同じように、もしかしたら、波を起こして造波抵抗を減らし、長距離遊泳中。体力が消耗

しないようにしているのではないだろうか。渡り鳥も腹を凹ませて飛んでいる。自然は私達の「発想の師」である。また、最近の戦闘機も腹が凹んでいる。主翼だけでなく、胴体にもキャンバーが付き、機体全体で揚力を得ているようだ。船体沈下を防ぐため、船にキャンバーを付けることも、自然の理に適っていると思うのである。

#### 4.4 船型開発プロジェクトチーム(参考)

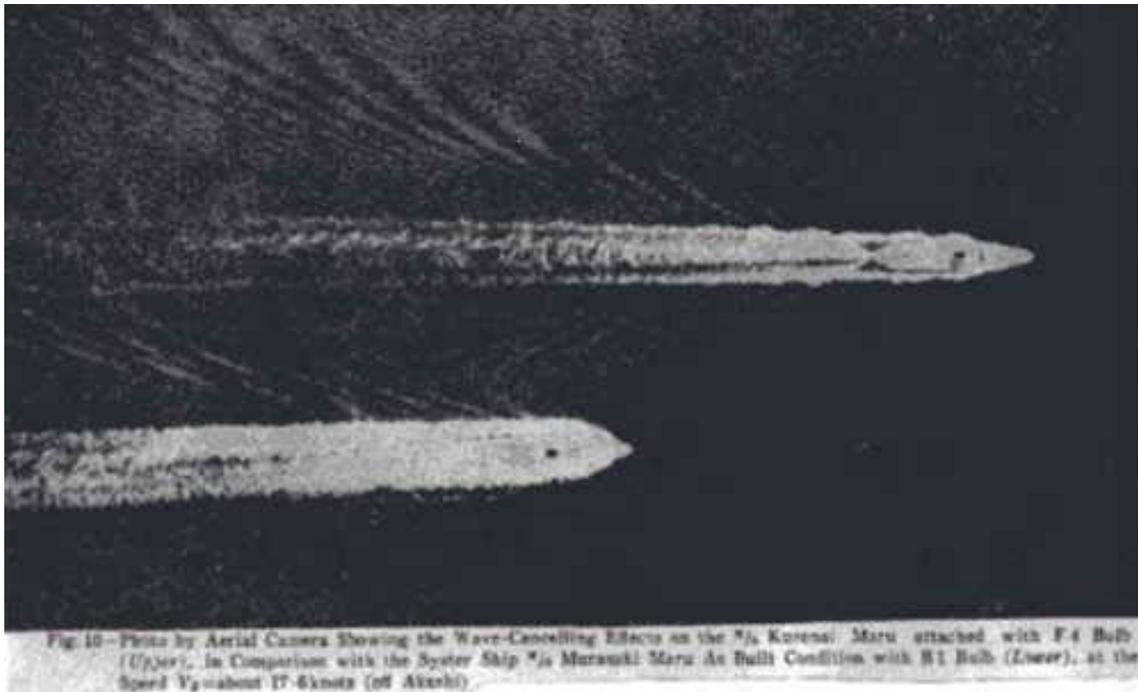
船底凹入船および船底凸出船の開発は(株)臼杵造船所の「船型研究業務」の一環として行われた。開発当時、シップアンドオーシャン財団から補助金を受け、西日本流体技研、旧日本造船技術センターの多くの人達の援助を戴いた。旧関西造船協会へ2論文が提出され、1論文が関西造船協会賞を受賞した。関西造船協会会長、くれない丸球状船首実船試験でお世話になった、元三菱重工、甲斐敬二さんからお祝の言葉を受け、川重の山野惟夫さんとの誌上討論で、設計コンセプトについて多大の評価を戴いたことを思い出す。この船型開発(1990年-1995年)に参加したのは7名、黒沢明監督の「7人の侍」を思い出す。7名全員、よく気が合い、アウンの呼吸で仕事が進んだ。自然の成行きに如く計画は進行した。著者にとっては長年歩んできた「船型設計研究の最終段階」であった。ほんとうに素晴らしい人達と出会ったと思っている。この人達がチームにいないと、新船型の誕生・建造成功はなかったと思う。7名のメンバーを記して本項を終わる。(敬称略)

森垣 勉	川重 OB、戦時中、空母建造の現場担当、株式会社 臼杵造船所社長(当時)、船型開発者、積極的にチームに参加し激励を続ける。1995年逝去
福嶋祥人	船型開発初期、設計部長、後、専務、副社長、現在社長。2006年より社長 積極的に開発に参加
釘宮 了	設計部課長、次長、部長、現在、取締役(資材、設計担当)
西本 仁	西日本流体技研役員 回流水槽試験の権威 船型改良のプロ。
玉島正裕	西日本流体技研役員(当時)回流水槽試験の権威 素晴らしい技術力保有
田中 拓	元船研部長、造船技術センター常務理事(当時)
塙 友雄	臼杵造船所顧問(当時)開発の技術指導 技術面のリーダー

上記の人達が残した、忘れられない語録

森垣	「技術力の向上、画期的な成果、その貢献度、計り知れず」
福嶋	「現場に聞いてみたら、ブロックで造ったものを搭載するだけ、船底が凹もうが膨らもうが、やる気があるから気にしない。」
釘宮	「いつもどおりの手順。しゅくしゅくとやりましょう。やる気充分」
田中	「三胴船？面白いですね。」
玉島	「西日本流体技研は新しい技術に取組まなければ駄目になる。」
西本	「船型開発は回流水槽が最適、波形を詳しく調べ、船体形状を修正する。性能改善は容易。」

## 5 くれない丸球状船首実船試験 (造波抵抗研究発展の導火線)



**Fig. 10 くれない丸球状船首実船試験 東京大学の試験、三菱神戸造船所、運輸省船舶局、関西汽船が協力  
明石海峡岩屋沖 上がくれない丸、下がむらさき丸、くれない丸(試験用大型船首バルブ付)の波は  
むらさき丸(姉妹船、小型船首バルブ付)よりかなり少ない。**

1961年3月16日、午後2時頃、川重の明石工場を離陸したヘリコプター(高幣先生)が撮影した写真である。1962年、乾先生がアメリカ、ミシガン大学開催の SNAME に発表、セッションを巻き起こし、その後10年以内に全世界に球状船首が普及した。むらさき丸との併走計画が決ったのは、試験当日のくれない丸船上、筆者はむらさき丸との無線電話連絡を担当した。営業航海中のむらさき丸船長は併走を快諾した。両船が岩屋沖に差し掛かった時、海峡は船舶往来が激しかった。長い距離の併走は危険だと感じる。両船間隔は約80m、速力19ノット、むらさき丸船上では大勢の船客が手を振っている。始めて目にする光景だ。雲が低く垂れ込めていた。「ヘリはどうしたのだろう...」。くれない丸の端艇甲板上で乾先生と共にやきもきする。一瞬、機影が視界を掠める。両船は併走を離脱。間髪をいれず「撮影成功」の無線電話。貴重な瞬間であった。すべてが成功...。長くて短い一日であった。

既述のとおり、くれない丸球状船首実船試験の後、多くの研究者が精力的に努力し、造波抵抗理論の研究が進展した。波形解析研究も進められた。そして、造波抵抗理論の船型設計への応用が急速に実用化した。乾先生の「連続吹き出し分布に特異点を付加して、造波干渉理論により波消しを行う」とのコンセプトは全世界に普及し、現在は球状船首を持

たない船を探し出すのが難しい程である。多くの大手造船所、研究所は統計解析法・波形解析法に造波抵抗理論を組合せた独自の船型設計法を開発した。また、線形造波抵抗理論計算で最適船型を求める諸方法も進歩した。中でも、極小造波抵抗理論は1963年、丸尾・別所両先生の無限喫水極小造波抵抗理論、1971年丸尾・山越先生の有限喫水極小造波抵抗理論が発表され、最適  $C_p$  曲線の船型設計への応用は広く普及した。

くれない丸球状船首実船試験は、これら造波抵抗研究発展の「導火線」であり、プライベートな話したが、著者が船型設計の道を歩む「運命の扉」であった。



Fig. 11 くれない丸

2999GT 1960年 三菱重工神戸造船所建造 船主、関西汽船。瀬戸内海の女王として別府航路観光便第1船としてデビューした。当時、優れた性能、豪華な設備をもつ画期的客船として話題をまいた。球状船首実船試験の外に、船内非常脱出実船試験(於、三菱重工神戸造船所、実行：海難防止協会、協力：関西汽船、協力：神戸造船設計部家族)も行われた。現在、ロイヤルウイングと船名を変え、横浜港レストランシップとして就航している。

くれない丸は、阪神－別府航路の航海速力を、それまでの14-15ノットの時代から一挙に18ノットの時代に引上げた船であった。しかも、当時の別府栈橋の状況から、全長は90m以下を強いられ、航海フルード数は造波抵抗急増の忌避領域、 $Fn=0.32$ に突入し、さらに、観光船として大きな上部構造を支え、満載喫水線に近い第二甲板に600名定員の客室を設けるため、復原性確保の太い水線面形状が必要と云うハンデイが附加された。こうした不利な条件のもとで船型設計が行われ、球状船首を採用し、悪条件をカバーすべく研究が続けられたが、当時は未だ造波抵抗理論発展の初期段階で、仕掛かりの球状船首研究のまま、建造着手の日を迎えた。研究はくれない丸就航後も継続され、就航後1年目に、大型球状船首実船試験が行われた。その後も造波抵抗理論の研究は留まるところを知らず、研究成果は、卒先して実船の船型開発に応用された。殆どの船の抵抗性能が革新された。

## 6 船底凹入”太古”と従来船の波形比較 (Fn=0.38 でも波静か)



Fig. 12 従来船 あいぼり丸 3165 GT 1967 年建造 Fn=0.36 20.5 ノット



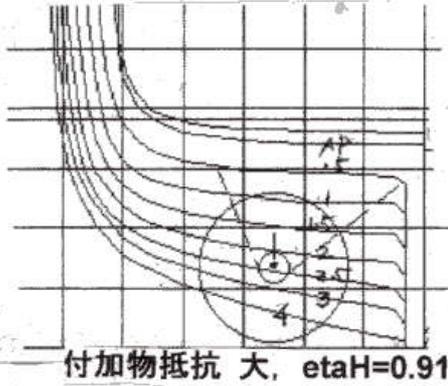
Fig. 13 太古 1250 GT 1992 年建造 船側水位凹入なし、波形小さい Fn=0.38 20.5 ノット

従来船、あいぼり丸は、くれない丸の 5 年後(1967 年)に建造された、関西汽船の船。くれない丸同様、著者の担当船であった。無限喫水極小造波抵抗理論 Cp 曲線が採用され、また、小型球状船首付きであるが、線形理論非線形修正に気を使って船体が痩せ、船尾沈下が大きい等、今からみれば万全の抵抗性能ではなかったが、くれない丸よりは、かなり改善されていた。前回の文章で「太古の所要馬力は従来船の 84%である」と記述したが、その従来船がこのあいぼり丸である。(もし、くれない丸と比較すれば太古の所要馬力は従来船の 70%である)。上掲、太古の写真の波形は船体中央部水線の凹入もなく、船首波全体が小さいことが明瞭である。上の写真の航走速度、太古は Fn=0.38、あいぼり丸は Fn=0.36、共に 20.5 ノットである。純客船あいぼり丸が営業をリタイアした時に、太古が就航した。著者にとっては因縁的であった。

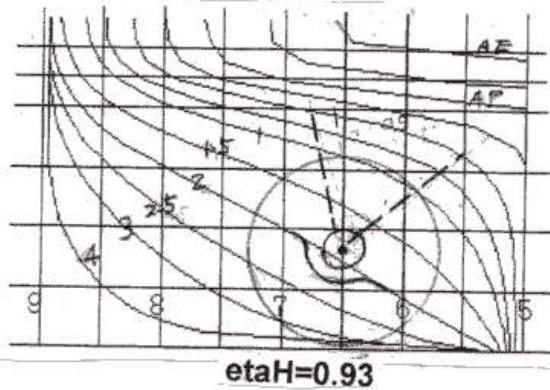
## 7 2軸船の船尾形状各種 (次の各図を Fig. 14 とする) (参考)

今後も2軸船建造は続くだろう。抵抗推進性能を左右するので、参考のために図示する。

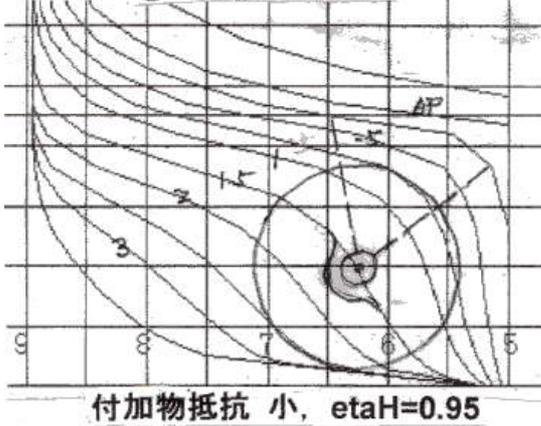
① TAYLOR 船型



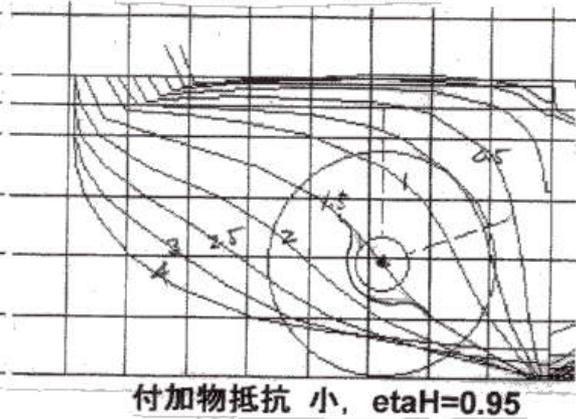
② 普通船型



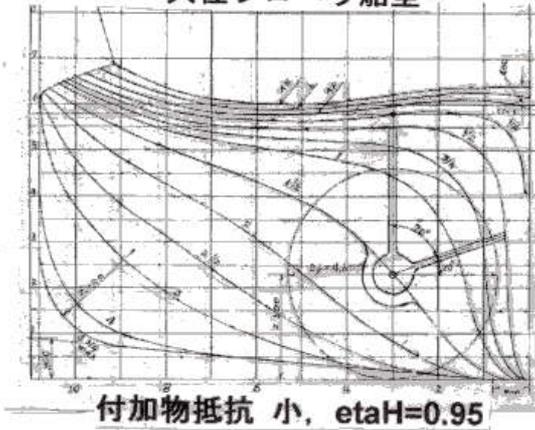
③ 近接2軸船型



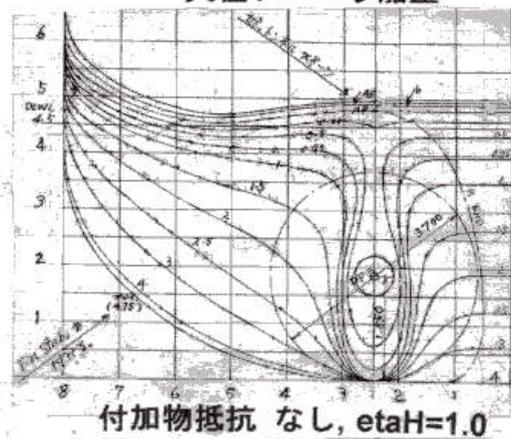
④ 近接2軸  
大径プロペラ船型



⑤ セミトンネル船尾  
大径プロペラ船型



⑥ セミトンネル双船尾  
大径プロペラ船型



## —中速船 (Fn=0.27-0.18) 船型設計コンセプト—

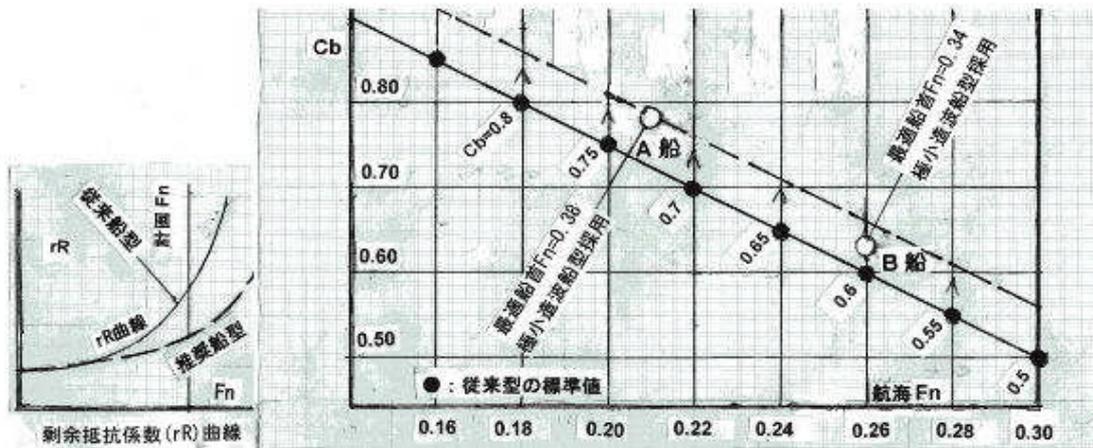


Fig. 15 航海フルード数と方形係数  $C_b$  の関係

今まで、高速船のことばかり述べてきた。今度は中速船へ話しを移そう。その前に、一般の従来船の、航海フルード数  $F_n$  と方形係数  $C_b$  の関係を Fig. 15 に示した。永い年月の間に●印と太い実線のような標準的な関係ができたようである。すなわち、航海  $F_n=0.30$  は  $C_b=0.50$ 、 $F_n=0.28$  は  $C_b=0.55$ 、 $F_n=0.26$  は  $C_b=0.60$ 、 $F_n=0.24$  は  $C_b=0.65$ 、 $F_n=0.22$  は  $C_b=0.70$ 、 $F_n=0.20$  は  $C_b=0.75$ 、 $F_n=0.18$  は  $C_b=0.80$ 、 $F_n=0.16$  は  $C_b=0.85$  が標準である。そして  $F_n=0.30-0.28$  を高速船、 $F_n=0.27-0.18$  を中速船、 $F_n=0.16$  以下を低速船と呼ぶことにする。高速船の  $C_p$  曲線の最適形状は、船体中央頂部の曲率が強く、船首先細りの形状で、球状船首が小さい(5-6%中央断面積  $FP$ )。極小造波抵抗理論船型、他の造波抵抗理論船型、Taylor 船型、いずれも、同じ形状になる。「やせ型高速船型」としてよく知られ、余り設計上の問題は起きないから本文では取扱わない。

さて、中速船は、フルード数も低く、一見、造波抵抗上の問題はないように見えるが、そうではなく、造波は船体中央平行部に発生せず、船首尾部に集中するので、中央平行部と船首尾部の接続部(接続部は通常、滑らかに角が落とされるが、そうでない場合もある)、および船首部と球状船首との接合部に圧力分布の不具合が起り易い。そうになると、大きな抵抗増加が生じ、要注意である。例えばフルード数  $F_n=0.26$  の中速船を例にすると、中央平行部長さは約  $0.2L_{pp}$ (接続部の角を落とすから実際はこれより短い)、造波抵抗に直結する船首  $F_n$  は  $F_n E = 1 / (0.8)^{0.5} \times 0.26$  ( $F_n$ ) = 0.29 となる。また、船首部の長さ・幅比は小さく、結構、幅広高速船である。非線形造波も増大する。Fig. 15 の●印では  $C_b$  が 0.60(標準値)と小さいから、余り問題は起きないが、○印の A 船、B 船のように  $C_b$  値を破線の位置または、それ近くまで、引上げると、通常の場合、必ずと云ってもよい程、抵抗が急増し、性能が低下する。以下、この A 船、B 船を例として中速船の船型設計コンセプトを述べたいと思う。

第1例  $F_n=0.26$ 、 $C_b=0.60 \rightarrow 0.63$  B船(冷凍運搬船) (Fig. 16、Fig. 17 参照)

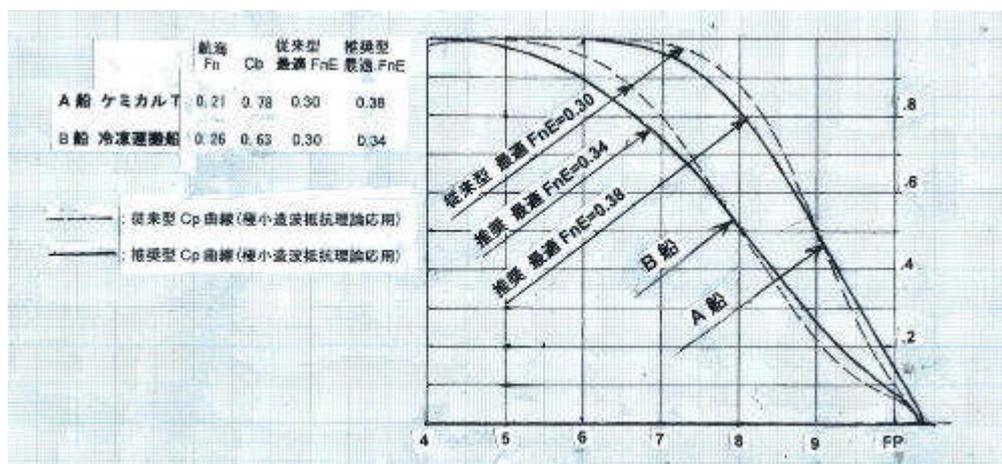


Fig. 16  $F_n=0.26$  B船(冷凍運搬船) 従来型と修正型  $C_p$  曲線比較

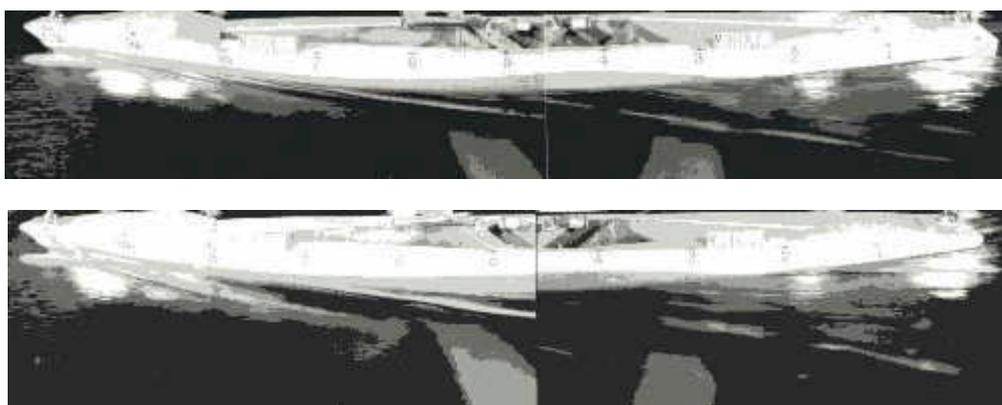
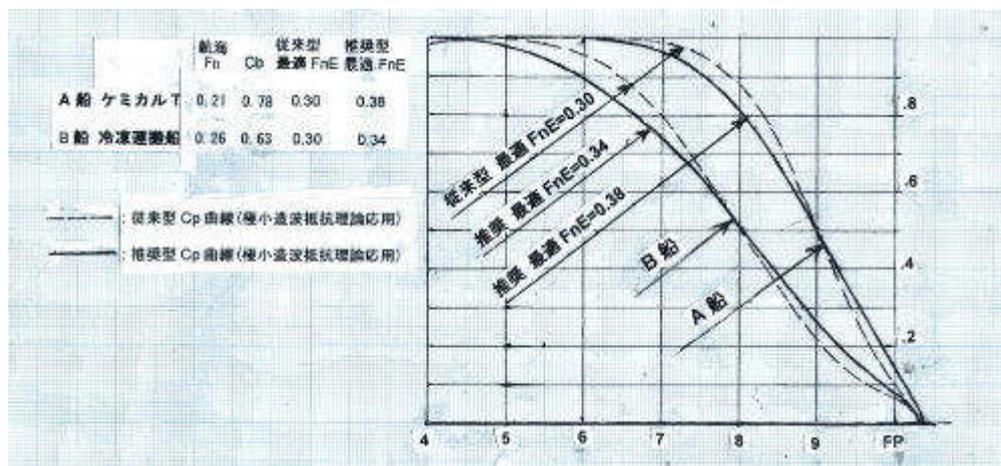


Fig. 17 上 B船(冷凍運搬船)、従来型、船側波形 SS. 9 で波発生、SS. 8 は船側波凹入  
下 船首  $C_p$  曲線を最適値  $F_nE=0.34$  極小造波型に改正後 波形均一

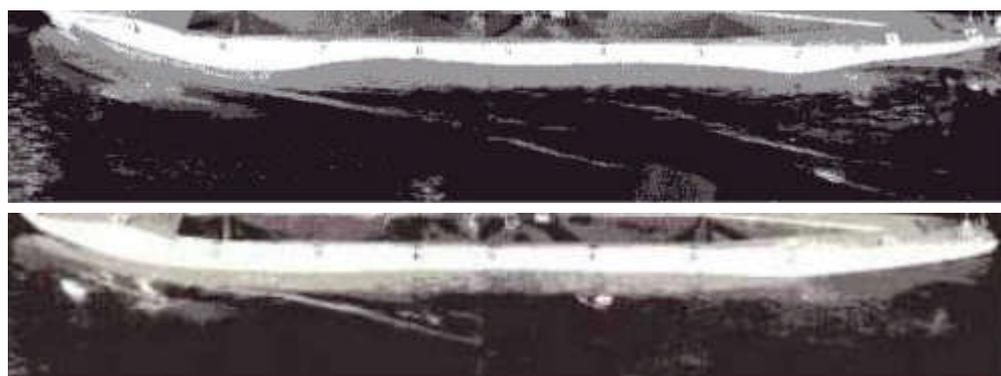
第1例は Fig. 15 に○印で記載した B 船(冷凍運搬船)を取上げる。Fig. 16 に B 船の従来船型  $C_p$  曲線を破線で、改正船型  $C_p$  曲線を実線で、また、Fig. 17 に両船の水槽試験の船側波形写真を示す。 $F_n=0.26$  のこの船型(冷凍運搬船)はバナナ状態のときに  $F_n=0.27$  を要求される過酷な船型である。この船の  $C_b$  を  $0.60 \rightarrow 0.63$  に引上げる場合は、母型の  $C_p$  曲線の形状はその儘にして、中央平行部長さを  $0.2L_{pp} \rightarrow 0.26L_{pp}$  程度(接続部の角を落とすから、実際の中央平行部は、これより短い)まで大きくするのが普通で、それで、方形係数は  $C_b=0.63$  となる。これを従来船型と名付ける。船首フルード数は、 $F_nE=1/(0.74)^{0.5}=0.30$  で、改正前と余り変わらない。やせ型高速フェリー並みの値である。SS. 6-7 が「肩張り」状態になり、この部分の船体表面圧力は負圧、SS. 9.5 付近も  $C_p$  曲線の凹みが目立ち、船体表面の圧力が上昇して船側波を盛り上げる。船首バルブ先端から出る波と、SS. 9 付近から出る波の

2 条の船首波が発生する。Fig. 15 左側に図示するように、計画速度において、従来船型の  $rR$  曲線値は急増し、船の性能がおかしくなる。この対策は、「一高フルード船 ( $F_n=0.30-0.45$ ) 船型設計コンセプト、2 航海  $F_n=0.30-0.35$  の船型」に述べたように高速向きの  $C_p$  曲線を採用する。すなわち、従来船の船首部形状を最適  $F_n=0.34$  の極小造波  $C_p$  曲線(かなり余裕をとった高速側)に入れ替える。この改正  $C_p$  曲線を Fig. 16 に実線(B 船)で記載した。SS7. 肩部は削られて、滑らかな曲線に直り、SS.9 の凹みが埋められておとなしい凹みに変えられる。それで、船首部表面圧力は均一分布に変わる。Fig. 17 下に示しているのが、改正後の水槽試験の写真である。船側波形は均一化されている。剰余抵抗値は Fig. 15 の左側図の推奨船型の  $rR$  曲線のように低下し、 $C_b$  増大に関わらず性能が改善される。

**第 2 例  $F_n=0.21$ 、 $C_b=0.73 \rightarrow 0.78$  A 船(ケミカル T) (Fig. 16、Fig. 18 参照)**



**Fig. 16  $F_n=0.21$  A 船(ケミカルタンカー) 従来型と改正型  $C_p$  曲線比較**



**Fig. 18 上 A 船(ケミカルタンカー) 従来型 船側波形**

**下 船首  $C_p$  曲線を最適値  $F_nE=0.38$  (太古型) 極小造波型に改正後 波形均一になる**

第 2 例では、Fig. 15 記載、○印の A 船(ケミカルタンカー)について述べる。 $F_n=0.21$ 、 $C_b=0.73$  の従来船を  $C_b=0.78$  まで、 $C_b$  を 0.05 大きくする。従来船型( $C_b=0.78$ )の中央平行

部長さは約  $0.55L_{pp}$  ( $C_b$  増大のため  $0.45L_{pp} \rightarrow 0.55L_{pp}$ ) (接続部の角を落とすから、実際の中央平行部はこれより短い)、かなり長大である。Fig. 16 に示されるように、肩部凸出、船首部凹入が大きいのは、長大な中央平行部が、 $C_p$  曲線を船首方向へ圧縮するからである。短い船首部内で船体表面の負圧、正圧の圧力が激しく変動し、Fig. 18 上の水槽試験波形写真のように、船側水位の凹凸が甚だしい。こう云う状態では船体抵抗もかなり増加する。対策として、この場合も、 $Fn > 0.3$  高速船コンセプトを流用して、船首部形状を思い切って高速向きとし、最適  $Fn = 0.38$  の極小造波抵抗  $C_p$  曲線に入れ替える。この最適  $Fn = 0.38$  の採用によって SS. 8.7 から船首端までの  $C_p$  曲線は直線状になる。そして、球状船首と首船船体は一体化する。Fig. 18 下は改正後の水槽試験船側波形である。船側水位の凹凸が僅少になり、Fig. 15 の左側図の推奨船型  $rR$  曲線のように、抵抗が減少する。排水量増大による馬力損失を吸収して、逆に所要馬力は低減する。今後は、大きな  $C_b$  値、主船体と長大な球状船首は一体化し、直線状に近い船首水線形状の船が流行るかも知れない。

B 船、A 船の話しを総合すると、「すべての中速船に通ずることであるが、 $C_b$  を増大させる場合は、船首部形状を極小造波抵抗  $C_p$  曲線 ( $Fn = 0.34 - 0.38$ ) に入れ替え、船体表面の負圧、正圧を均一化させる必要がある。そうすれば、所要馬力が低減する優れた船型をうることができる。高速船で述べたコンセプトと全く同じである。」

## —おわりに—

最後に云いたいことは、船型設計を行う場合、理論諸計算や水槽試験も重要ですが、ブラックボックスの答えだけを求めるのではなく、最も大切なことは、「造波の源である船体表面上の圧力分布がどうなるかを、設計者自身が考え、推定し、それを回流水槽で確かめて、船体形状と船体周り流れを自分で理解することです。そして、諸計算や水槽試験成績の内容を、源を知ることによって完全に把握し、設計に反映させるのです。勿論、粘性その他の問題についても同様です」。本文では、当然のことを回りくどく記述しましたが、50年間の経験を通じ、著者の記憶に強く留まっていることを纏めました。船型関係以外の方には、冗長な、文章を読んで頂き有難うございました。

2010年8月下旬

—完—