SRC資料室(10)

最適船型(その1)

船型や速力を変えると推進性能が変化し所要動力(馬力)が変化します。今後、数回に渡って、船の主要寸法、長さ方向排水量分布等と推進性能の関係を紹介し、所要動力が最小となる船型について検討します。

1. 主要寸法と推進性能

船の長さL_{PP}、幅B、喫水d、方形係数C_Bと推進性能との関係を示します。船の排水量Δは

$$\Delta=\rho\nabla \quad \nabla=L_{PP}\ B\ d\ C_B \quad (1)$$

ここに、ρ;海水の密度　∇;排水容積

で表されますが、これを構成する長さ等を1つずつ変更する場合の所要動力の変化の例を示します。船の寸法は、港や航行海域の水深、港湾設備、貨物形状、建造設備等に由来する制限がありますが、ここでは、これらの事情を無視し、自由に寸法を変更できるものと仮定して推進性能を求めます。推進性能の推定には、日本造船技術センターで実施した水槽試験結果から得られた回帰式を使用しました。本節で示すのは船の主要寸法のみを使用して推定した推進性能で、個々の船型について求めた結果ではありません。よって、平均的なフレームラインや長さ方向排水量分布を有する船型の推進性能を示しています。

表-1　2船型の主要寸法等

	痩せ型船型	肥大船型
長さ	200m	
船幅	30.0m	34.0m
計画喫水	10.0m	12.5m
方形係数	0.6	0.8
排水量長比	0.0045	0.0085
プロペラ直径	7.00m	6.82m
計画速力	21.0ノット	15.0ノット
フルード数	0.242	0.173

船の長さ等を変更する際の中心となる2船型を表-1に示します。プロペラ直径は、船の排水量長比等によって決まる平均的な値を過去の実績から求めています。

図-1は、この2船型の有効動力P_Eと伝達動力P_Dです。計画満載状態における性能です(以下、同様)。プロペラ効率は、過去の実績を整理して求めた、プロペラ荷重度によって決まる平均的な効率を使用しています。その際、最適直径に近いプロペラが得られる出力や回転数を有する主機関が存在するものと仮定し、最適効率に近いプロペラ効率のプロペラが常に採用できるものとしています。

表-1、図-1に示す2船型を中心に、船の長さ等を変更して推進性能の変化を見ますが、長さ等を変更すると、(1)式に示すように、それに比例して排水量も変わります。排水量=一定の条件下における変更例は次回に示す予定です。

痩せ型船型では21ノットの速力における所要動力等について検討しますが、フルード数が同一としますと、この速力は長さが100mの船で14.8ノット、300mの船で25.7ノットに相当します。肥大船型では15ノットの速力で検討しますが、これは長さが100mの船で10.6ノット、300mの船で18.4ノットに相当します。

(1)船の長さ

図-2は長さを変更した場合の有効動力と伝達動力です。左側は痩せ型船型の21ノットにおける動力、右側は肥大船型の15ノットにおける動力です。船の長さのみ変更し、他の船幅等は変更してい

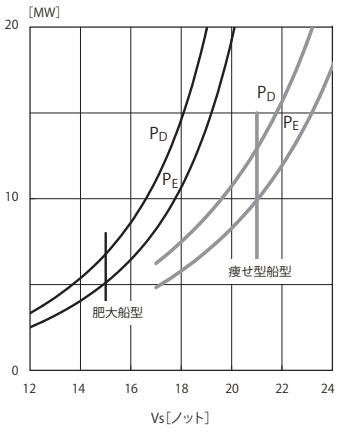


図-1
2船型の有効動力と伝達動力

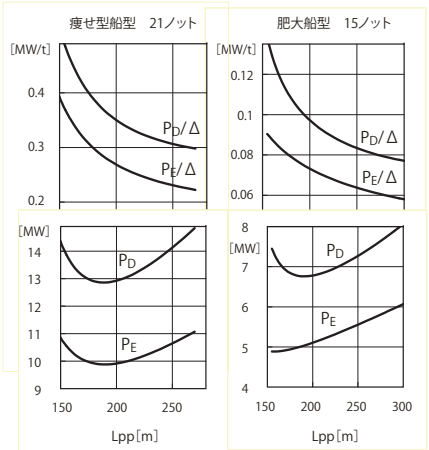


図-2
船の長さの変更

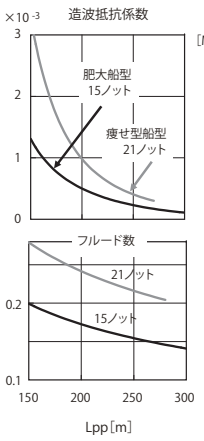


図-3
長さ変更とフルード数、造波抵抗係数

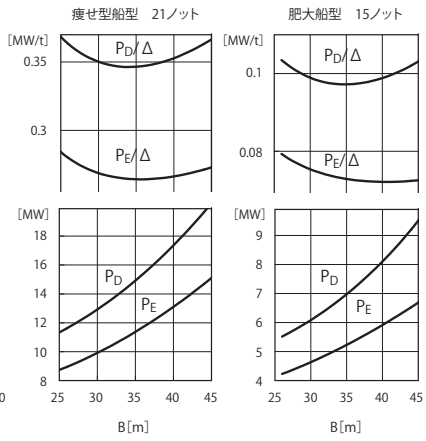


図-4　船幅の変更

ませんので、長さに比例して排水量も変化します。図-2の上段図は動力を排水量で割ったもので、排水量当りの動力を示します。痩せ型船型では、船の長さが短い領域で、逆に有効動力（船体抵抗）が増加していますが、これは、図-3に示すように、フルード数の増加に伴う造波抵抗の急増に起因します。また、肥大船型の伝達動力も船の長さが短い領域で増加していますが、これは、プロペラ荷重度増大に伴うプロペラ効率の低下が主因です。船の長さを短くすると、長さ／幅比が小さくなりますので、推進性能は全般的に劣化し、排水量当りの所要動力も急激に増加します。伝達動力が最小となる長さがありますので、それを最適長さとも言えますが、排水量当りの伝達動力は長さの増大に伴い単調に減少していますので、推進性能からは、長い船ほど良い船型と言えます。

（2）船の幅

船幅を変更した場合の伝達動力等を図-4に示します。これによると、幅を大きくすると有効動力、伝達動力ともに単調に増加しますが、その増加率は幅（排水量）の増加率と同程度ですので、排水量当りの動力の変化は小さくなっており、最小となる幅が存在しています。これは、船幅増加は船の長さ／幅比の減少ですから、それによる性能低下が原因です。

（3）喫水

図-5に船の計画満載喫水を変更した例を示します。有効動力は喫水変化に伴い単調に変化していますが、伝達動力は、喫水の浅い領域で逆に増加しています。これは、プロペラ直径減少に伴うプロペラ荷重度増加によるプロペラ効率低下（図-6）が原因です。そのため、排水量当りの動力は、喫水が浅い領域で急増しています。

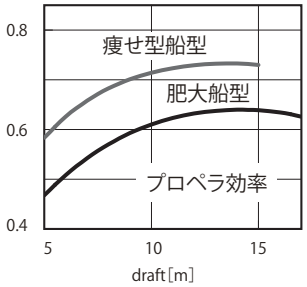


図-6　喫水変更とプロペラ効率

喫水変更の場合も、長さを変更した場合と同様、伝達動力が最小となる喫水が存在しますが、排水量当りの動力は、喫水増加に伴い単調に減少しますので、喫水の深い船型が良い船型と言えます。

（4）方形係数

方形係数を変更した場合の伝達動力等を図-7に示します。これによると、方形係数を大きくすると有効動力、伝達動力ともに単調に増加しますが、その増加率は、方形係数が小さい領域では方形係数（排水量）の増加率と同程度ですので、排水量当りの動力の変化は小さくなっており、これが最小となる方形係数が存在しています。ただし、方形係数を大きくすると、排水量当りの動力も急増するようになります。急増の主な原因は造波抵抗係数の急増ですが、造波抵抗が急増するフルード数は方形係数等によって決まります。

（5）まとめ

図-8では、以上に示した伝達動力、排水量当りの伝達動力を排水量ベースで比較しています。本図には、参考のため、相似形状を保ちつつ船の大きさを変更した場合の伝達動力、および、伝達動力が排水量に比例する線も示しています。

本図によると、排水量変更に伴う伝達動力の変化率が最も大きいのは、方形係数の変更です。船幅変更がそれに次ぎます。これらでは、排水量当りの伝達動力に最小値が存在します。伝達動力の変化率が最も小さいのは長さを長くした場合で、それに次ぐのは喫水変更です。伝達動力には最小値が存在し、それより長さの短い領域ないしは喫水が浅い船型の領域では逆に伝達馬力が増加しますが、排水量当りの伝達動力は排水量が大きくなるに伴い単調に増加します。

方形係数は、港湾や航行海域からの制限や船殻重量の変化が少ない要素ですが、方形係数の限度を超えた増加は推進性能の急激な悪化となります。

（技術顧問　佐藤和範）

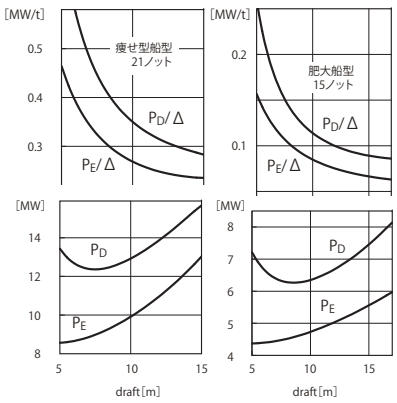


図-5　喫水の変更

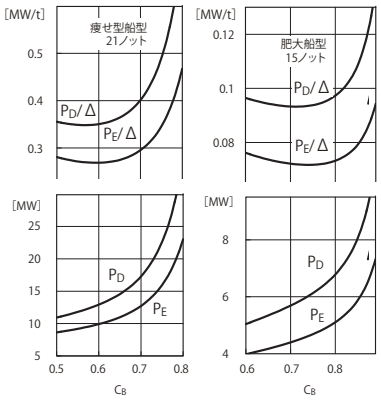


図-7　方形係数の変更

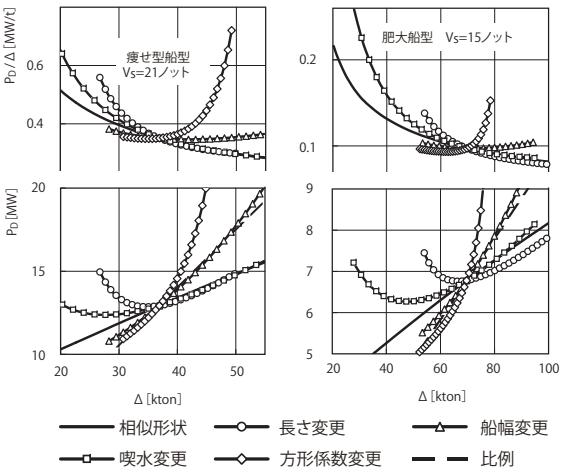


図-8　各種変更の比較

SRC資料室(11)

最適船型(その2)

2. 排水量=一定で船幅等を変更

本節では、前節(SRC News No.90)に示した2船型について、「排水量=一定」という条件下で、船幅、方形係数、喫水を変更する場合の推進性能を示します。船の長さは変更しませんので、排水量長比∇/L_{PP}^3は一定です。

本節における検討は、「船幅を変更し、その分だけ方形係数も変更した場合の推進性能」という、よく検討されるテーマを含んでいます。また、造波抵抗理論の適用の一つとして、「排水量=一定」の条件下で造波抵抗が極小となる「船幅×柱状係数の組み合わせ」を求める問題が研究されましたが、それは、造波抵抗係数のラストハンプとフルード数が0.3付近のハンプの二つのハンプ間の高フルード数領域における極小値問題です。本節で対象とするフルード数は、大型船舶の計画フルード数付近で、より低いフルード数領域です。また、本節では、造波抵抗ではなく、伝達動力の大小を評価の基準とします。ただし、復原性能等の他の性能については対象外とします。

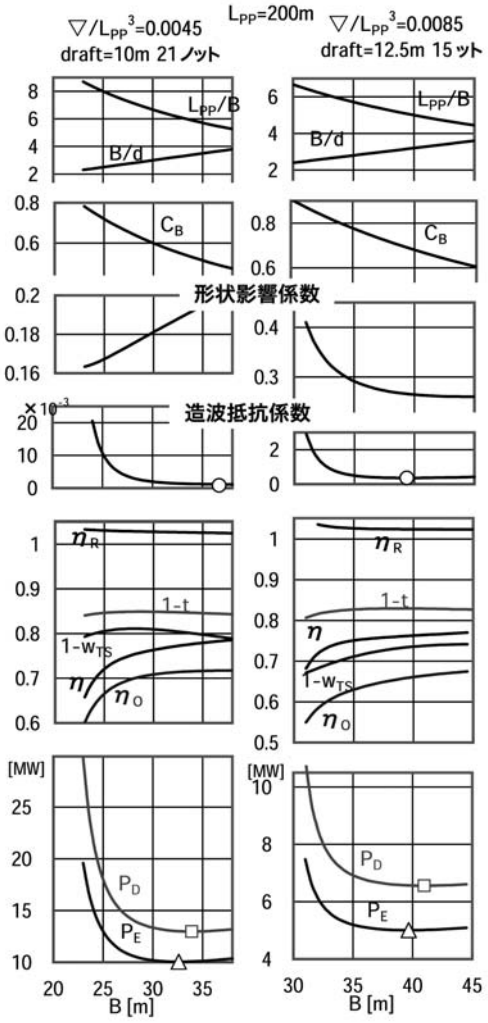


図-9 「船幅×方形係数=一定」の場合の推進性能

(1)船幅と方形係数を変更

最初は、排水量Δと長さL_{PP}だけではなく、喫水dと船速も一定の場合を示します。残る船型要素は船幅Bと方形係数C_Bのみです。

(1)式

$\Delta=\rho\nabla \quad \nabla=L_{PP}\ B\ d\ C_B$ (1)

から「船幅×方形係数=一定」が条件となりますから、船幅を変更すると方形係数も自動的に変化します。これは、前節(前号)の(2)船幅変更および(4)方形係数変更の組み合わせになっています。一般的に、船幅を広くすると推進性能は悪くなりますが、方形係数を小さくすると推進性能は逆に良くなります。船幅の影響と方形係数の影響の大きさの違いが、本項の主題です。

推進性能推定結果を図-9に示します。左側が∇/L_{PP}^3=0.0045の痩せ型船の例、右側が∇/L_{PP}^3=0.0085の肥大船型の例です(前号の表-1参照)。横軸は船幅としていますが、この変更に対応して方形係数も変化しています。変更幅は使用した回帰式の適用範囲内としました。最上段の図は長さ/幅比と幅/喫水比の変化で、次が方形係数、さらに形状影響係数、造波抵抗係数$R_W/\rho\nabla^{2/3}V^2$、自航要素(船後プロペラ効率比η_R、スラスト減少係数1-t、有効伴流係数$1-w_{TS}$)やプロペラ単独効率η_O、推進係数ηが続き、最下段の図が有効動力P_Eと伝達動力P_Dの変化です。造波抵抗係数、有効動力、伝達動力が最小となる点は○、△、□印で示してあります。

本図から、船幅を狭くして方形係数を大きくすると造波抵抗係数が急増することが分かります。形状影響係数は、方形係数と長さ/幅比の影響の大小によって、船型肥大度によって異なった傾向となっています。推進係数は、船幅を狭くした場合に急激に悪くなっていますが、その主因は抵抗増加によるプロペラ単独効率の低下です。その結果、船幅を狭くして方形係数を大きくすると、伝達動力がより顕著に急増します。運河や港湾施設等による制限のため、船幅を狭くしてその分を方形係数増加で補うような場合は、慎重な検討が必要です。他方、○、△、□印に示す最小値より船幅を大きくしても、所要動力の増加は穏やかです。ただし、これは、いろいろな船型の平均的な傾向で、船型によっては、幅を大きくする場合の性能悪化が大きいこともありますので油断はできません。

船幅を大きくすると船殻重量が増えますから、排水量ではなく載貨重量で評価しますと、□印で示す船幅より狭い船型が最適となりますが、船のトータルコストに占める燃料費の比率が大きくなると□印の船幅に近づくと考えられます。

(2) 喫水も変更する場合

次に、計画喫水も変更した場合に、(1) で示したことがどのように変化するかを図-10に示します。喫水も細かく広範囲に変更して (1) と同様の手順で求めた伝達動力を等高線の形式で示しています。横軸は船幅、縦軸は計画喫水ですが、排水量と長さを一定にしていますので、船幅、喫水の変更に伴い方形係数も変更しています。本図には、船幅、喫水の変更に伴う長さ／幅比、幅／喫水比、方形係数の変化も破線で示してあります。また、各喫水において、伝達動力が最小となる船幅 (図-9の□印に対応)、すなわち、図中の各等高線で下に凸となる点を□印の点列で示してあります。

本図から、凡その傾向として、伝達動力が最小となる船幅は、喫水が深い船型で狭くなることが分かります。幅／喫水比がより小さくなる方向です。また、このとき、方形係数も小さくなります。ただし、肥大船型の例では、計画喫水が14mを超えると伝達動力が最小となる船幅は変化が小さくなっています。

なお、図-10から、船幅を一定とする場合は、伝達動力が最小となる喫水は存在しないことが分かります。喫水を深くすると伝達動力は単調に減少することを前節の (3) に示しましたが、ここでは、計画喫水増加に伴い方形係数が小さくなりますので、計画喫水増加による伝達動力減少はより顕著になります。

(3) 船速も変更する場合

最後に、以上の結論が、計画速力によってどのように変化するかを図-11に示します。表-1 (前号) に示した2船型について、排水量と長さを一定として、幾つかの喫水と計画速力に関して、計画速力および船幅と方形係数との組み合わせを変更して伝達動力が最小となる点を求めました。横軸は、船速に換えてフルード数Fnとしました。また、縦軸は方形係数としました。図中には、伝達動力が最小となる方形係数を○、△、□印の点列で示してあります。マークの違いは喫水の違いを示します。

また、本図には2船型の排水量長比∇/L_{PP}^3 に近い船型の計画フルード数と方形係数の実績値の領域も実線で示してあります。また、原油タンカー、ばら積み船、コンテナ船、自動車運搬船について、計画フルード数と方形係数の実績の領域を、各々、破線、点線、一点鎖線、二点差線で示してあります。これらの領域は、(財) 日本造船技術センターで水槽試験を実施した船型の計画フルード数と方形係数の分布から求めました。ただし、伝達動力が最小となる船速と方形係数を求める際には、排水量と長さを一定にしましたが、実績の領域は、全ての船型から求めた領域です。

この図から、伝達動力が最小となる方形係数は、計画フルード数が大きい場合に小さくなることが分かります。すなわち、計画フルード数が大きい船型では、船幅を大きくして方形係数を小さくする方が伝達動力は小さくなることを示しています。また、喫水が深い船型では、方形係数がより小さい船型で伝達動力が極小になることが分かります。

原油タンカーやばら積み船のような肥大船型では、実際に建造されている船型の方形係数とフルード数の領域は、伝達動力が最小となる組み合わせの上の方にありますから、これら船種では、現状の船型に比べて、船幅を広くしてその分だけ方形係数を小さくする方が伝達動力が少なくなります。前述のように、船幅を広くすると船殻重量が増えますので、伝達動力が極小となる船幅まで広げることはないと考えられますが、燃料費の占める割合が大きくなる場合、建造設備、港湾設備等の許容範囲内なら、現状より船幅を広げて、その分、方形係数を小さくする船型を検討する価値があります。

他方、痩せ型船型の場合は、現状の船型の船幅と方形係数の組み合わせは、伝達動力が極小となる組み合わせに近い所にありますので、船幅と方形係数の組み合わせ変更による性能改善は余り期待できないかも知れません。ただし、図-11に示した結果は、いろいろな船型の平均的傾向を示していますので、個々の船型では結論が異なることもあります。

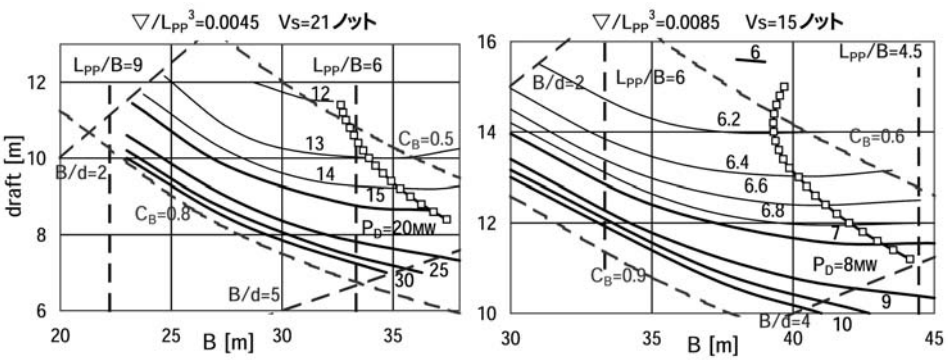


図-10 「喫水×船幅×方形係数=一定」の場合の伝達動力 L_{PP}=200m

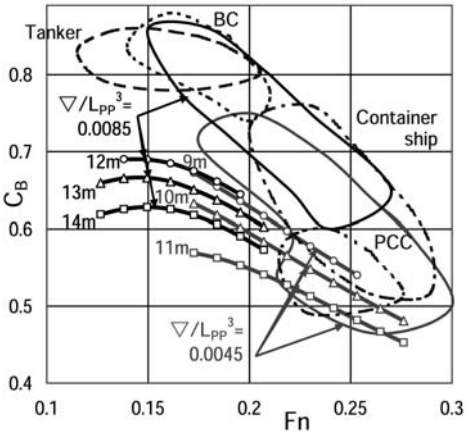


図-11 「船幅×方形係数=一定」の場合に伝達動力が最小となる方形係数 L_{PP}=200m

3. トン・マイル当りの所要エネルギー

本節では「トン・マイルが与えられたとき、それに要するエネルギーが最小となる載貨重量と航海距離の組み合わせを求める」という問題を扱います。時間当りの航海距離、所要エネルギーは船速、所要動力（馬力）ですから、上記の問題は「載貨重量×船速が与えられたとき、それに要する伝達動力が最小となる載貨重量と船速の組み合わせを求める」という問題になります。輸送量を

輸送量M[t・m/s]=載貨重量DWT×船速V　(2)

で定義します。輸送量が同じということは、たとえば、3万トンの貨物を20ノットで輸送することは、4万トンの貨物を15ノットで輸送することや6万トンの貨物を10ノットで輸送することと等価ということです。そして、何れの組み合わせで所要動力が最小となるか、という問題です。

なお、ここでは、載貨重量は

$DWT=\rho L_{PP}\ B\ d\ (C_B-C_L)$　(3)

で表しました。簡単のためC_Lを一定値（0.15）としましたが、このとき、載貨重量の排水量に対する比率は、方形係数がC_B=0.6の船型で0.75、C_B=0.8の船型で0.81となります。

(1) 相似船型

最初に、船型を相似に保ちつつ大きさを変更する場合の伝達動力を示します。表-1に示した2船型の大きさを変更した場合の船速、伝達動力を図-12に示します。(2) 式に示す輸送量を一定にしていますので、中段図に示すように船が大きくなると船速が低下します。伝達動力の関する無次元値（馬力係数）が船速（フルード数）に依らないと仮定しますと、所要動力は載貨重量の7/3乗にほぼ反比例して減少しますが、図-12で も、船速が小さい領域では、ほぼ7/3乗に反比例しています。

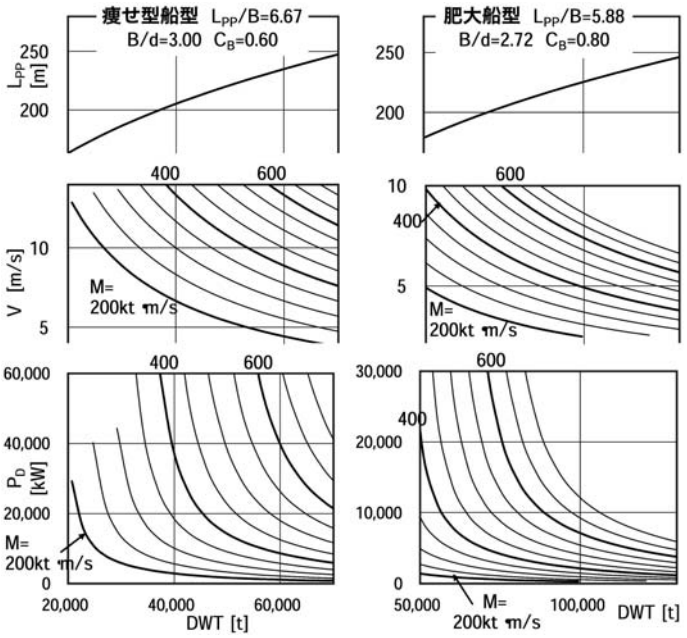


図-12　相似船型の載貨重量と伝達動力等

相似船型では、伝達動力が最小となる大きさは存在せず、「輸送量が同一の場合、大きい船の伝達動力が小さい」ということになります。船の建造費は載貨重量に比例するとしても、大きな船の優位性は揺るぎません。

(2) 方形係数のみ変更

次は、船の長さ、幅、喫水を変更せず、方形係数のみ変更するケースです。(3) 式で方形係数のみを変えることによって載貨重量を変更し、その分、船速を変更して (2) 式に示す輸送量を一定に保ちます。計算対象とする船の主要寸法（比）は、L_{PP}=200m、L_{PP}/B=6.0、B/d=3.0です。伝達動力P_Dを載貨重量ベースで図-13下段に示します。太線は、載貨重量ベースで、伝達動力が最小になる点を繋いだ線です。上段図は横軸を載貨重量、縦軸を船速として示す伝達動力の等高線で、輸送量の等高線も併記してあります。太線は、下段図と同じく載貨重量ベースで伝達動力が最小になる点を繋いだ線ですが、ここでは、伝達動力の等高線と輸送量の等高線が接する点を繋いだ線となります。

次に、載貨重量を方形係数、船速をフルード数に換えた図を図-14に示します。本図には、図-13に示した太線も変換して示す（R=1.0）とともに、同一の輸送量で伝達動力が1.5倍、2.0倍、3.0倍、4.0倍、5.0倍となる点を結んだ線も示してあります。また、原油タンカー、ばら積み船、コンテナ船、自動車運搬船の実績の範囲（図-11と同じ）も破線で併記してありますが、低速肥大船型（原油タンカー、ばら積み船）の実績の輸送量はM=280～460kt・m/s、コンテナ船ではM=320～480kt・m/sで、大して違わない値となっていることが分かります。

図-13, 14の○印、△印を例に採りますと、方形係数が0.6、載貨重量が34,170t、船速が11.7m/s（22.7ノット）の船型と、方形係数が0.8、載貨重量が49,350t、船速が8.1m/s（15.8ノット）の船型とは、輸送量が同等（M=400×10^3 t・m/s）で、伝達動力は前者が20,780kW、後者が7,680kWとなり3倍近い違いがあります。この輸送量では、方形係数が0.867、載貨重量が54,460t、船速が7.4m/s（14.3ノット）の船型で伝達動力が最低値6,850kWとなります。

図-14に示すように、実績船の方形係数とフルード数の組み合わせは、伝達動力が最低となる組み合わせ（R=1）に対して、方形係数が小さい領域にあります。低速肥大船型の実績は伝達動力が最低となる方形係数に近い領域にありますが、コンテナ船の実績はかなり離れた領域にあり、同一輸送量での伝達動力の最小値に比べて1.5～5倍の領域で運行されています。

ここでは、予め輸送量Mが与えられているとして、その上で、伝達動力が最小となる載貨重量、船速の組み合わせを求めました。実際には、船の運航費に対する燃料費と建造費の構成比率によって輸送

量が与えられ、その上で、伝達動力が最小となる載貨重量、船速の組み合わせが求められるものと考えられます。

なお、主要寸法（比）を変更しても、伝達動力が最小となる方形係数とフルード数の組み合わせは余り変化しません。

（3）船速を重視

（2）式の輸送量の代わりに次式を使用した例を示します。

$$M(N)=DWT\times V^{N} \quad (4)$$

本式では船速VをN乗しています。N≧1.0としますが、（2）式はN=1.0の場合に相当します。これは、（2）式に比べて船速をより重視した評価法です。「速いことは、それ自体が良いこと」という評価法です。たとえば、（2）式では船速の1%増と載貨重量の1%増は等価ですが、（4）式では、船速の1%増と載貨重量のN%増が等価です。

図-15に、図-13と同じ形式で、N=3の例を示します。上段図の伝達動力は図-13と同じものです。$M(3)=50\times10^{6}t(m/s)^{3}$で方形係数が0.6、0.8の場合を○印、△印で示しますが、N=3では、方形係数が0.6の船型の伝達動力の方が小さくなっています。伝達動力が最小となる組み合わせは、図-13に示したN=1の場合に比べて、載貨重量の小さい方向に移動しています。

図-16には、N=1.0、2.0、、、6.0に関して、伝達動力が最小となる方形係数とフルード数（載貨重量と船速から変換）の組み合わせ、および図-14と同じ実績船の分布を示します。本図によると、Nを大きくするに伴い、同一フルード数では、方形係数のより小さい方向に移動していることが分かります。原油タンカーやばら積み船の実績はN=1～3となっていますので、（2）式に示した輸送量に比べて船速を重視した選択となっていること、および、コンテナ船の実績はN=2～5に対応していますので、かなりの船速重視となっていることが分かります。

なお、自動車運搬船の実績はN=4～7の領域にあります。自動車運搬船の貨物は低比重ですから、載貨重量に比べて貨物容積が重要となりますので、（2）式や（4）式による載貨重量を使用する評価は馴染まないものと考えられます。また、RO/RO船はより痩せ型、より高速の領域が選択されますが、2軸船となることも多いので検討の対象外としました。

（技術顧問　佐藤和範）

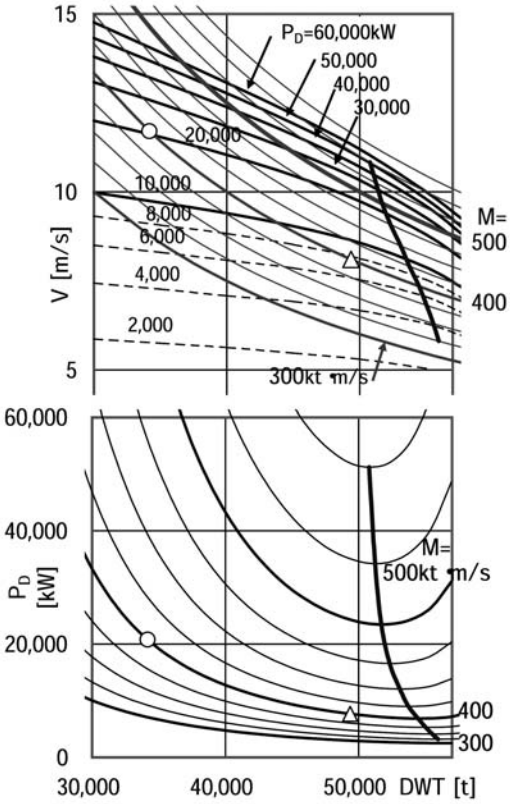


図-13　方形係数のみ変更

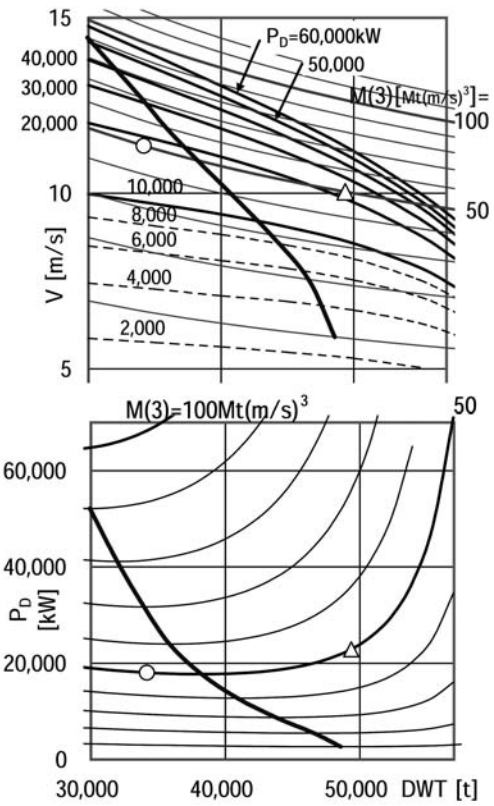


図-15　N=3の例

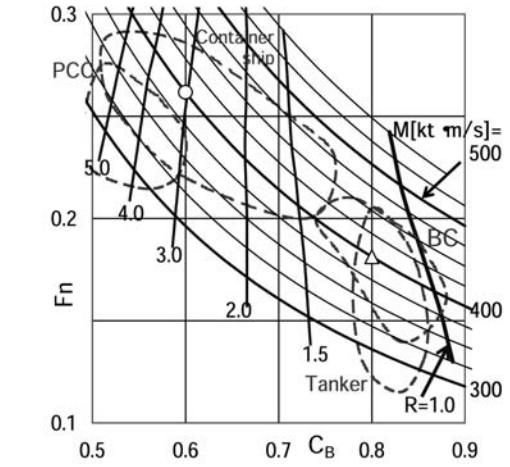


図-14　実績との比較

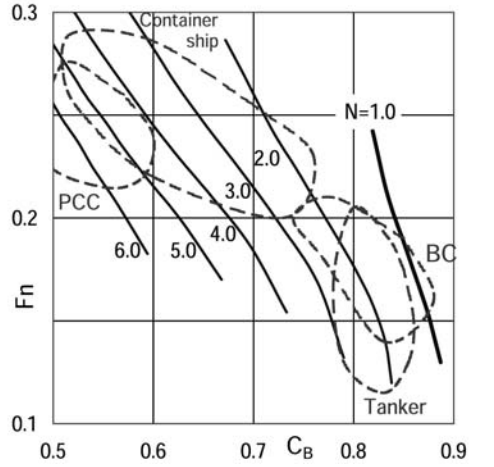


図-16　指数Nとの比較

SRC資料室(12)

最適船型(その3)

4. 最適船速

本節では最適船速について記述します。本章のタイトル「最適船型」からは逸脱しますが、大きさや船型が同じ船の船速を変えた場合の収入と支出を比較することによって、経済性からみた最適な船速を求めてみます。個々の船型について船速を変えた場合の収入、支出を求めて比較すればよい訳ですが、ここでは、一般的傾向を求めるため船速による収入、支出の変化を簡略化します。

ある期間tに距離dの航路を船速Vでピストン輸送するケースを想定し、この期間の運賃収入Iは、この期間中の航海数Kに比例すると仮定し、

$$I=rK \quad (5)$$

$$K=t/(d/V+c) \quad (6)$$

c　；荷役時間等の航海していない時間

d/V；航海している時間

と置きます。ここに、rは航海数を運賃収入に換算する係数で、ここでは定数とします。上式は、(4)式(SRC NEWS No.91)のNを1.0とした場合に対応します。

次に、同じ期間における支出Oは船舶建造費、船員費等の船速に依存しない固定部分O_Fと船速に依存する部分O_Vとの和

$$O=O_F+O_V \quad (7)$$

とし、さらに、船速依存部分は港湾使用料等の航海数Kに比例する部分と馬力に比例する部分の和

$$O_V=hK+pV^M\{(d/V)/(d/V+c)\} \quad (8)$$

で表します。hは航海数を費用に換算する係数で、これも定数とします。この式では馬力は船速VのM乗で変化すると仮定しています。第2項目の{ }内は、全時間に対する航海時間の割合を示しています。

pは馬力を支出に換算する係数で、性能の悪い船型では大きくなり、燃料費単価が上昇すると大きくなりますが、その値を一般的に決めることが困難ですので、固定部分O_Fとの比較で表すこととし、

$$O_F=pV_1^M \rightarrow p=O_F/V_1^M \quad (9)$$

によってV_1に変換します。V_1は、荷役時間を無視し、連続して一定の船速で航海する場合に馬力依存部分が固定部分に等しくなるような船速です。V_1はpとは逆の方向に変化しますが、固定部分とは同じ方向に変化します。すなわち、船舶建造費等の固定部分が上昇するとこの船速も上昇します。

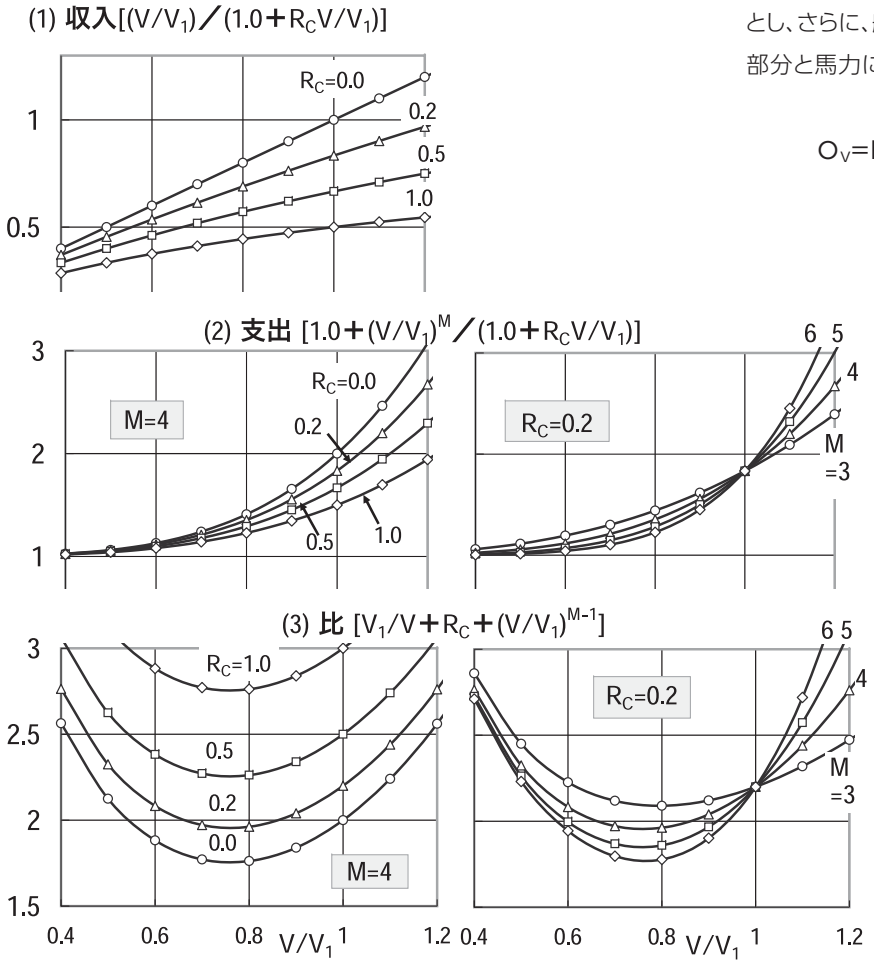


図-17　支出、収入の船速による変化

次に、荷役時間cも次式で無次元化しますが、

$$R_C=cV_1/d \quad (10)$$

これは、航海距離dを船速V_1で航海するのに要する時間d/V_1と荷役時間との比を表す係数で、荷役時間が無視できるほど少ない場合はR_C=0.0、航海時間と荷役時間が同じ場合はR_C=1.0です。

これらの変数置き換えの結果、

$$I=(rtV_1/d)[(V/V_1)\ /(1+R_CV/V_1)] \quad (11)$$

$$O=O_F[1+(V/V_1)^M/(1+R_CV/V_1)]+hI/r \quad (12)$$

$$O/I=(dO_F/rtV_1)[V_1/V+R_C+(V/V_1)^{M-1}]+h/r \quad (13)$$

となります。これらの式の[ ]内の値を図-17に示しますが、収入Iと支出Oの変化の違いから、その比には最小値があります。この比が最小となる船速を「最適船速」と定義します。

最適船速は(13)式をVで微分することによって得られますが、その際、MはVに依らないと仮定します。後述のコラムの図-24に示すようにMはVに依り変化しますが、それを考慮すると複雑な表式となり一般化が困難となります。Mを定数と仮定した場合の∂(O/I)／∂V=0となるVを最適船速V_{OPT}としますと、それは

$$V_{OPT}/V_1=(M-1)^{-1/M} \quad (14)$$

となります。最適船速はV_1に対する比としてMのみの関数として表されています。R_Cは表には現れていません。また、支出の航海数比例部分は、O/Iでは定数となりますので最適速力とは無関係となります。(14)式を図-18に示しますが、M>3.5ではV_{OPT}/V_1=0.76～0.77程度と狭い値域となります。すなわち、最適船速V_{OPT}は、V_1（連続して一定の船速で航海する場合に馬力依存部分が固定部分に等しくなるような船速）の76～77%程度となります。船速V_1の算定は多少面倒かも知れませんが、その76～77%は簡単に求まります。

最適船速での収入I_{OPT}、支出O_{OPT}およびその比は

$$I_{OPT}=(rtV_1/d)[1/(R_C+(M-1)^{-1/M})] \quad (15)$$

$$O_{OPT}=O_F[1+1/(M-1)\{1+R_C(M-1)^{-1/M}\}]+hK_{OPT} \quad (16)$$

$$O_{OPT}/I_{OPT}=(dO_F/rtV_1)\{R_C+M(M-1)^{1/M-1}\}+h/r \quad (17)$$

となります。(16)式の[ ]内の第二項を図-19に示します。これは、馬力依存部分の固定部分に対する割合ですが、M=4の場合、荷役時間が少なくR_C=0.1程度の航路では、馬力依存部分の費用が固定部分の30%となるような船速が最適船速となることが分かります。航海時間と荷役時間が同程度であるR_C=1.0の航路では、馬力依存部分の費用が固定部分の20%となるような船速が最適船速となります。馬力依存部分はMが小さい場合に大きくなり、Mが大きい場合に小さくなります。図-18に比べて、図-19の表現の方が直感的に分かり易いかもしれません。

5. 最適浮心前後位置

以上、第4節までは、長さ、幅、喫水、排水量、計画速力という船の基本的な要目に関する最適船型の検討ですが、以降の節は、もう少し細かい船型要素の最適値に関する検討です。本節では、所要馬力等が最小となる浮心前後位置の例を示します。

「船の長さ、幅、喫水が同一」という条件で方形係数を大きくすると、それに比例して排水量は増加しますが、概ね、抵抗増加等により推進性能は悪く（所要馬力が増加）なります。逆に方形係数を小さく

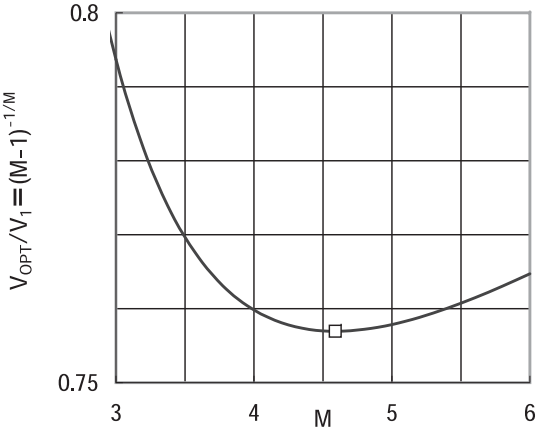


図-18　最適船速

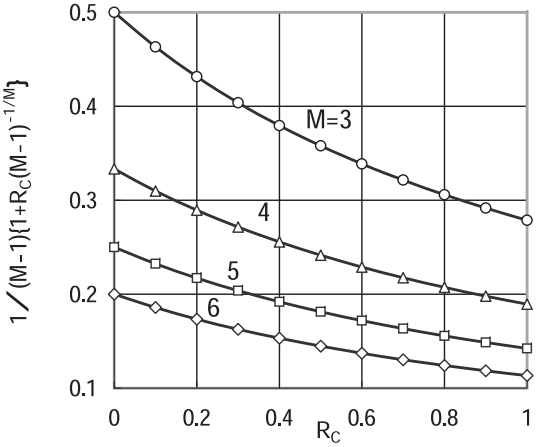


図-19　最適船速の場合の馬力比例部分の固定部分に対する割合

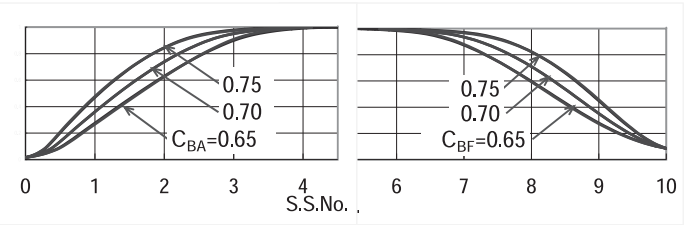


図-20　船体後半部、前半部の方形係数を変えたCpカーブの例

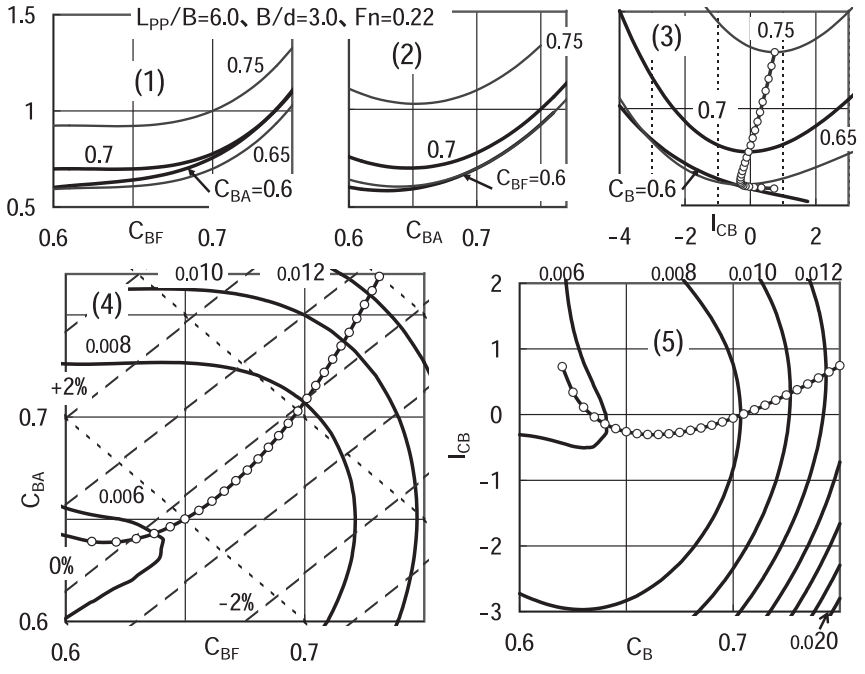


図-21　造波抵抗係数 $R_W/\rho(L_{PP}Bd)^{2/3}V^2$の例

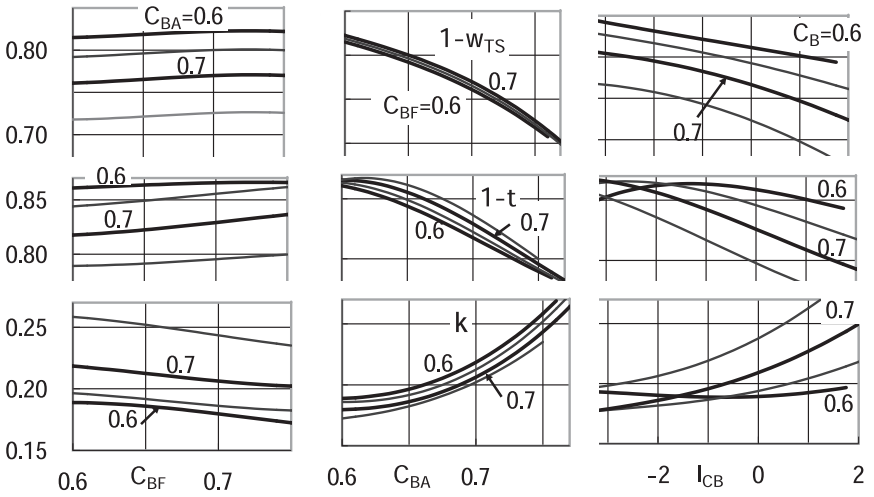


図-22　形状影響係数、スラスト減少係数、有効伴流係数の例

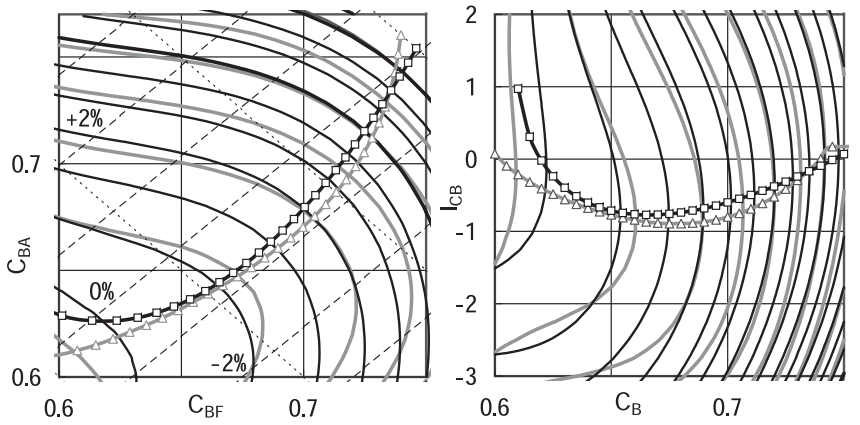


図-23　全抵抗係数、馬力係数の例

すると推進性能は良くなります。しからば、たとえば、後半部方形係数を大きくするが、その分だけ前半部の方形係数を小さくして全体の排水量を変えない場合、推進性能はどうなるでしょうか？この場合、船の浮心位置は船体後方に移動しますが、推進性能が最適となる浮心前後位置が存在する場合、それを最適浮心前後位置と呼んでいます。最適浮心前後位置はC_Pカーブの形やフレームライン等のより微細な船型要素によっても変わりますが、本節では、最適浮心前後位置を後半部、前半部の方形係数との関連でのみ検討します。そのために、図-20に示すように、後半部、前半部の方形係数C_{BA}、C_{BF}を変えた船型の推進性能を推定して比較します。フレームライン等はステーション移動法で変更しました。

浮心前後位置は重心前後位置と一致する必要がありますので、推進性能の都合のみで決めることはできませんが、船型設計においては常に意識しておくべき問題です。

図-21は、図-20のようにC_{BA}、C_{BF}を変えた場合の造波抵抗係数を示します。これは、直接的な実験結果ではなく、当センターで実施した水槽試験結果から求めた回帰式による計算結果で、L_{PP}/B=6.0、B/d=3.0の平均的な船型の満載喫水におけるフルード数=0.22での性能です（以下、同様）。また、造波抵抗係数としては、分母に排水量を含まない係数としてあります（以下、同様）。(1)はC_{BF}ベースの造波抵抗係数です。(2)、(3)は同じデータをC_{BA}ベース、浮心前後位置l_{CB}ベースで示した図です。なお、l_{CB}は、船体中央を基準にその後方にある場合を+とし、垂線間長L_{PP}に対する割合（%）で表しています。下段の(4)、(5)は同じデータの等高線表示です。(4)の破線、点線は浮心前後位置、全体の方形係数が一定の線です。

全体の方形係数が一定という条件下で造波抵抗が最小となる浮心前後位置、後半部、前半部の方形係数を○印の点列で示してあります。これが、造波抵抗係数ベースの最適浮心前後位置で、(3)では各曲線の最小値を結んだ線、(5)では各等高線の最右点を結んだ線、(4)では各等高線が方形係数=一定の点線と接する点を結んだ線で、すべて同じ曲線を異なる形式で示すものとなっています。

従来、造波抵抗理論の応用問題として、図-21に示す造波抵抗が最小となる浮心前後位置に関する研究が実施されていますが、最終的に重要なのは、造波抵抗ではなく馬力です。有効馬力は造波抵抗に加えて形状影響係数によって変わります。伝達馬力は、さらに自航要素やプロペラ効率によって変わります。図-22は、形状影響係数、スラスト減少係数、有効伴流係数の変化を図-21の(1)-(3)と同じ形式で示した図です。これらの性能要素は浮心前後位置によって変わりますが、その主因はC_{BA}の影響であることが分かります。図-23はこれらを考慮して計算した全抵抗係数、馬力係数（有効馬力、伝達馬力の無次元係数）の等高線で、図-21の(4)、(5)と同じ形式で示してあります。薄い線が全抵抗係数、濃い線が馬力係数の等高線です。全抵抗係数ベース、馬力係数ベースの最適浮心前後位置を△印、□印の点列で示してあります。

ここで示した例は平均的船型に関する例ですが、最適浮心前後位置は主要寸法比や次回に紹介予定のC_Pカーブの肩張り度、さらに、フレームライン等のより微細な船型要素によっても変化します。

（技術顧問　佐藤和範）

Column　伝達馬力は船速の3乗に比例する?

船の所要馬力は船速増加に伴い増加しますが、普通、船速の3乗に比例して増加すると言われます。図-24に当センターで実施した水槽試験結果から求めた回帰式による計算例（計画満載状態）を示します。左下の(1)は方形係数がC_B=0.50，0.55,...0.90の船型の船速Vベースの伝達馬力P_Dです。図中の各馬力カーブには、$P_D \propto V^M$とした時の累乗Mが整数となる点を○印で示し、各馬力カーブ上で同じMの値となる○印を繋いだ線も示してあります。左上の(2)は同じデータについて縦軸を馬力係数p'とした図です。右側の図は左側の図に示したMをC_Bベースで示した図で、縦軸は(3)フルード数Fn、(4)船速です。

馬力係数にハンプのあるFn=0.315付近より小さいフルード数では船速増加に伴いMが増加していることが分かります。指数Mは馬力カーブの立ち上がりの急激さを示す数値にもなっています。

図-25はMの実績を示す図で、当センターで水槽試験を実施した船型の計画速力付近の伝達馬力のMです。M=3～9の範囲にばらついていますが、船の長さとの相関が大きいように見えます。すなわち、小さな船のMは大きく平均値はM=5程度、大きな船では小さくM=3程度です。普通言われているM=3は、平均的値では無く下限値とでも言うべき値で、全体的平均値はM=4程度となっています。

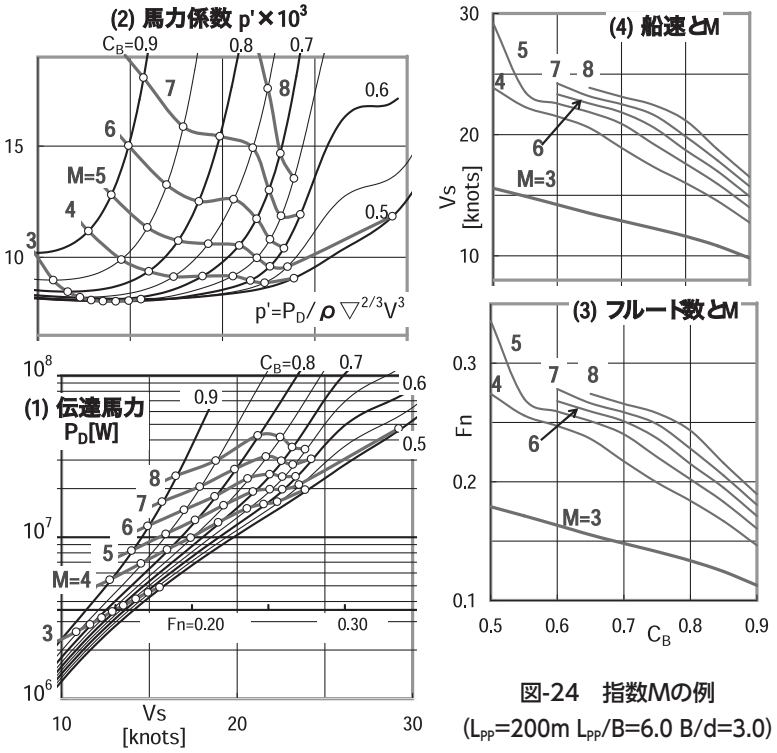


図-24　指数Mの例
(L_{PP}=200m L_{PP}/B=6.0 B/d=3.0)

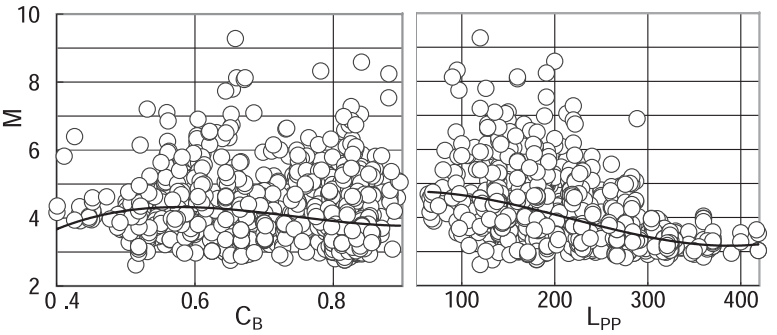


図-25　指数Mの実績

SRC資料室(13)

最適船型(その4)

6. 最適浮心前後位置と最適肩張り度

本節では所要馬力が最小となるc_Pカーブについて検討します。ただし、カーブそのものではなくそれを積分した値である浮心前後位置、肩張り度と所要馬力との関係についての検討です。

6.1 肩張り度の定義

最初に肩張り度を定義します。c_Pカーブの肩張り度(肩張り、肩落ち)は、浮心前後位置と共に推進性能に影響する重要なパラメータですが、その絶対評価が無いと不便なので、次式にて定義します。(コラム参照)

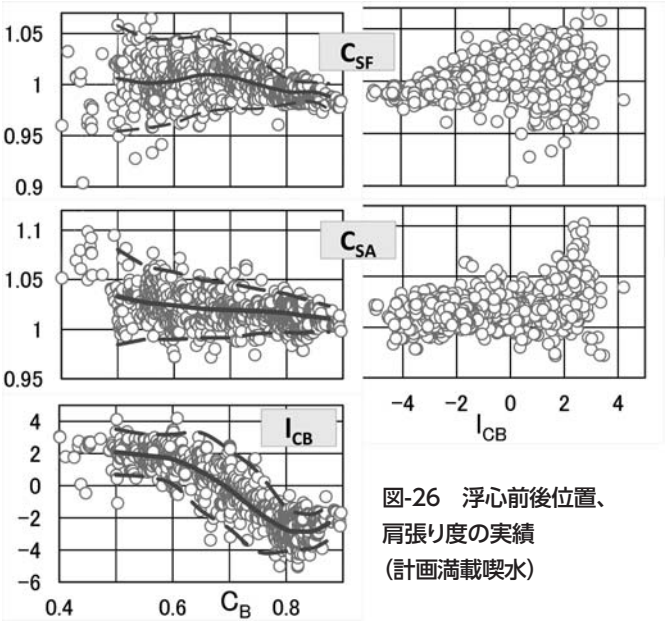


図-26　浮心前後位置、肩張り度の実績(計画満載喫水)

$$C_S=\int P(x)^2dx/\{\int P(x)dx\}^{1.5} \quad (18)$$

ここに、P(x)；c_Pカーブ　A.P.；x=0　F.P.；x=1.0
船体後半部肩張り度 C_{SA}　積分範囲；船尾端～0.5
船体前半部肩張り度 C_{SF}　積分範囲；0.5～船首端

分母の{ }内は柱状係数(C_{PA}、C_{PF})です。なお、参考のため、浮心前後位置l_{CB}を同一形式で示すと

$$l_{CB}=\int xP(x)dx/\int P(x)dx \quad (19)$$

となります(積分範囲は船尾端～船首端)。これは、浮心位置のA.P.からの距離を表しますが、通常は、船体中央からの距離を垂線間長L_{PP}に対する百分率[%]で表しています。本稿では、浮心が船尾側にある場合をプラスとしています。

図-26に肩張り度C_{SF}、C_{SA}の実績を示します。左側の図は方形係数ベースの肩張り度ですが、参考のため、浮心前後位置の実績も示します。また、右側には、浮心前後位置との相関も示します。本図から、上式で定義した肩張り度は1.0付近の値を有すること、方形係数や浮心前後位置との相関が小さいことが分かります。また、肩張り度の値域は、方形係数の小さい船型で大きく、方形係数の大きい船型で小さくなっていること、その程度は船体前半部肩張り度で著しいことが分かります。これは、肩張り度の定義式にも依りますが、方形係数の大きい船型ではc_Pカーブの形に関する自由度が少ないことに依ると考えられます。

6.2 ステーション移動法

本稿では所要馬力等が最小となる浮心前後位置と肩張り度を求めるため、或る船型(原型)の浮心前後位置、肩張り度を系統的に変更し、その推進性能を求めます。浮心前後位置、肩張り度の変更にはステーション移動法を用いました。ステーション移動法とは、一定の規則に従ってフレームラインを前後に移動する方法で、図-27(1)に示す△印、◇印におけるフレームライン形状は原型の○印におけるそれと同じです。ステーション移動法としては、「1-CP法」がポピュラーですが、ここでは次式によりステーション(フレームライン)を移動しました。

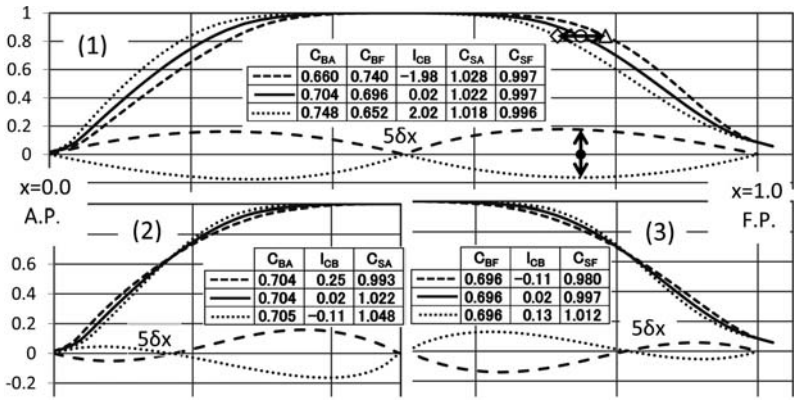


図-27　ステーション移動の例(M=1,N=1)

$$\delta x=\varepsilon x^M(x_E-x)^N(x_C-x)^C \quad (20)$$

ここに、δx；ステーション移動量

x　；移動前の前後方向位置 $x=0\sim x_E$

$x=0$ ；A.P.またはF.P.

$x=x_E$；船体中央 or 船体平行部端

C=0 主に浮心前後位置を変更

C=1 主に肩張り度を変更

x_C　；c_Pカーブの交点を制御

ステーションの移動量は、上式のεの大きさを変えることや上式を繰り返し適用することによって調整できます。M、Nは移動量の形を制御する係数で、M>0、N≧0が条件となります。M、N等を変えると、浮心前後位置や肩張り度が同じであっても異なるc_Pカーブが得られます。整数である必要はありませんが、本稿ではM=1、N=1としました。なお、M=1、N=0とすると1-CP法となります。

図-27に上式にてステーションを移動した例を示します。(1) はC=0として浮心前後位置変更を目論んだ例で、実線が原型、破線、点線が変更船型のc_Pカーブです。図中には肩張り度も示していますが、少し変化しています。(2)、(3) はC=1.0として上式を船体後半部、船体前半部に適用した例です。図中には浮心前後位置も示していますが、少し変化しています。浮心前後位置のみを変えるステーション移動法、肩張り度のみを変えるステーション移動法が望ましいのですが、難しいようです。

Column 肩張り度の定義の比較

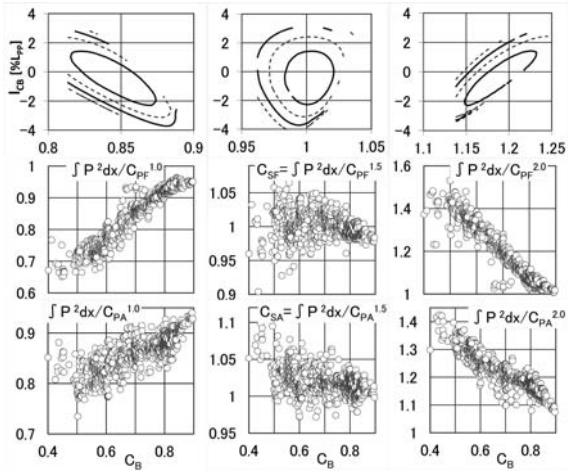


図-28　肩張り度の定義

図-28は肩張り度の定義式の分母にある柱状係数C_{PA}、C_{PF}の累乗を1.0、1.5、2.0と変えた例です。1.0や2.0の定義では、実績データを示した中段図、下段図に示すように、方形係数との相関が大きくなります。また、上段図に示すように船体前半部肩張り度、浮心前後位置を横軸、縦軸とした馬力係数の等高線が傾いた楕円となってしまい、不便です。このことから、本稿では1.5としました。

6.3　浮心前後位置、肩張り度と推進性能

船体前半部肩張り度、浮心前後位置、船体後半部肩張り度を変更したときの推進性能（形状影響係数k、造波抵抗係数r_W、船後プロペラ効率比η_R、スラスト減少係数1-t、有効伴流係数1-w_{TS}、馬力係数p'）を等高線の形式で、図-29（C_B=0.60）、30（C_B=0.80）に示します。（1）は船体後半部肩張り度を一定（C_B=0.60の船型ではC_{SA}=1.02、C_B=0.80の船型ではC_{SA}=1.01）に保った上で、船体前半部肩張り度と浮心前後位置を変えた場合の推進性能です。馬力係数には最小値min.p'がありますが、それを2重線の交点で示してあります。この交点の座標を（min.C_{SF}、min.l_{CB}）と称することにします。（2）はC_{SF}=min.C_{SF}として船体後半部肩張り度と浮心前後位置を変えたときの推進性能、（3）はl_{CB}=min.l_{CB}として船体前半部、船体後半部の肩張り度を変えたときの推進性能です。

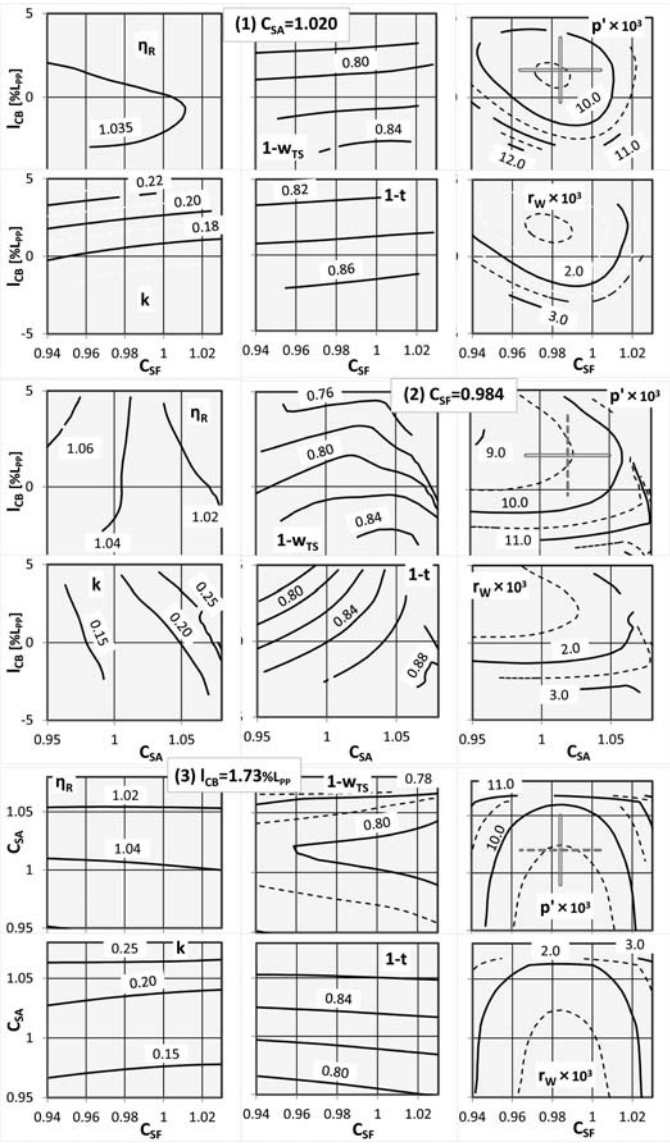


図-29　浮心前後位置、肩張り度と推進性能要素
C_B=0.60 F_n=0.25

なお、対象とした船型はL_{PP}/B=6.0、B/d=3.0の各方形係数における平均的な船型です。載貨状態は計画満載喫水で、フルード数は各方形係数における平均的な設計フルード数です。特に断らない限り、以下の計算例でも同様です。また、本節に示す推進性能は、日本造船技術センターで実施した水槽試験結果から求めた回帰式による推定値で、直接的な試験結果ではありません。この回帰式の適用範囲外の領域に対しては、等高線等の計算結果を示していません。

これらの図から、形状影響係数は、浮心前後位置と船体後半部肩張り度の影響が大きいことが分かります。ただし、船体前半部肩張り度の影響が皆無という訳ではなく、C_{SF}が大きくなるに伴い、形状影響係数は少し減少しています。

造波抵抗係数は、それが最小となる船体前半部肩張り度と浮心前後位置との組み合わせが有ります。また、方形係数が0.80の船型では、船体前半部肩張り度が大きく浮心前後位置が小さい領域で等高線が密になっており、造波抵抗係数が急増しています。船体後半部肩張り度に関しては、造波抵抗係数に及ぼす影響が比較的小さくなっています。図-31に船体前半部肩張り度と浮心前後位置をmin.C_{SF}、min.l_{CB}として船体後半部肩張り度を変えた場合の造波抵抗係数と馬力係数を示します。造波抵抗係数は船体後半部肩張り度が小さくなる伴い小さくなる傾向が見られますが、最小値は存在していません。本図に示した領域の左側に最小値が存在する可能性はありますが、それは、推進性能推定に使用した回帰式の適用範囲外であり、対応するc_Pカーブも不自然な形となる可能性が大きくなります。

スラスト減少係数、有効伴流係数も、形状影響係数の場合と同様、浮心前後位置や船体後半部肩張り度の影響が大きく、船体前半部肩張り度の影響が小さくなっています。ただし、有効伴流係数と船体後半部肩張り度との関係は少し複雑で、極大値があるように見えます。船後プロペラ効率比では、船体後半部肩張り度の影響が大きく、肩が張ると小さくなる傾向があります。

形状影響係数や自航要素との関連でいうと、船体前半部を肩張りにすると、形状影響係数が少し減少し、スラスト減少係数が少し増加します。浮心位置を後方にすると、船後プロペラ効率比が増加し、有効伴流係数が減少しますが、形状影響係数が増加し、スラスト減少係数が減少してしまいます。船体後半部を肩張りにすると、スラスト減少係数が増加しますが、形状影響係数が増加し船後プロペラ効率比が減少してしまいます。

馬力係数については、造波抵抗係数の場合と同様、それが最小となる船体前半部肩張り度と浮心前後位置との組み合わせが有ります。馬力係数に対しては造波抵抗係数の影響が最も大きいのですが、形状影響係数や自航要素の影響で等高線の深さがより顕著になっています。また、船体前半部肩張り度が大きく浮心前後位置が小さい領域で馬力係数が急増していますが、これは前述の造波抵抗係数の急増に起因します。

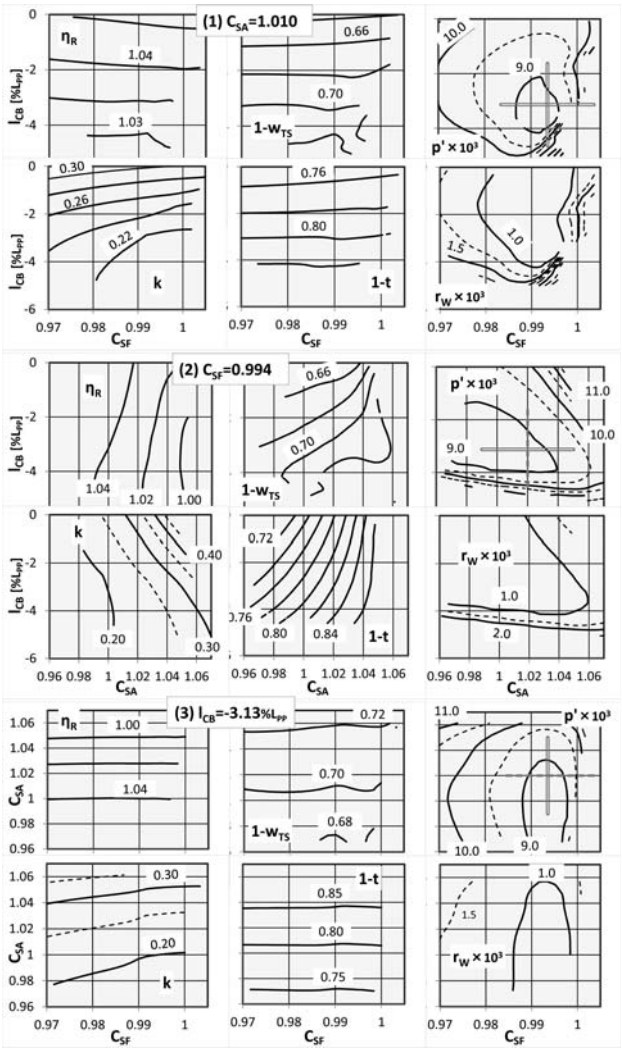


図-30　浮心前後位置、肩張り度と推進性能要素
C_B=0.80 F_n=0.18

なお、図-31に示すように、方形係数が0.80の船型では馬力係数が最小となる船体後半部肩張り度が存在しています。これは、船体後半部を肩落ちにした場合のスラスト減少係数の悪化に起因しますが、造波抵抗係数が最小となる船体後半部肩張り度が存在しない場合でも馬力係数ベースでは最小値が存在することがあります。しかし、馬力係数の最小値も存在しないことが多く、本稿では馬力係数が最小となる船体後半部肩張り度は追及せず、船体後半部肩張り度を予め与えて、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度と浮心前後位置の組み合わせを求めることとします。

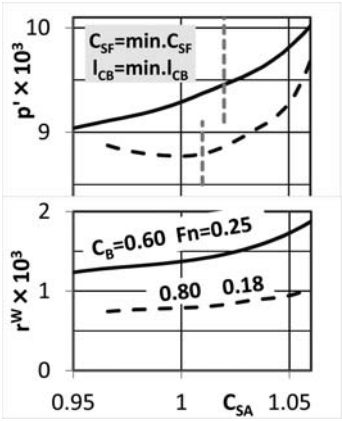


図-31　船体後半部肩張り度と造波抵抗係数、馬力係数

次回は、最適浮心前後位置と最適肩張り度に関する続きです。

（技術顧問　佐藤和範）

SRC資料室(14)

最適船型(その5)

最適浮心前後位置と最適肩張り度に関する前号からの続きです。

6.4 造波抵抗係数ベースの最適値と馬力係数ベースの最適値

造波抵抗が最小となる浮心前後位置やc_Pカーブは、造波抵抗理論の適用として研究されてきています。また、同様の目的で、水槽試験結果を整理・解析した研究も数多くあります。

本稿では、主に、造波抵抗ではなく伝達馬力が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置を示しますが、それに先立って本項では、図-32に、造波抵抗係数が最小となる肩張り度等と馬力係数(伝達馬力の無次元係数)が最小となる肩張り度等との比較を示します。横軸は造波抵抗係数が最小となる船体前半部肩張り度と浮心前後位置で、縦軸は馬力係数が最小となる値です。計画満載状態の設計フルード数における値ですが、いろいろな船型に関して、船体前半部肩張り度と浮心前後位置を格子状に変えて推進性能を計算(水槽試験結果から求めた回帰式を使用)し、造波抵抗係数や馬力係数が最小となる(船体前半部肩張り度min.C_{SF}、浮心前後位置min.l_{CB})の組み合わせを求めた結果です。船体後半部肩張り度C_{SA}は実績から求めた平均的値としました。

図-32(1)から、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度は、造波抵抗係数が最小となるそれとほとんど同じですが、方形係数の小さい船型では少し大きく(肩張り)なっています。

また、(2)に示した浮心前後位置では、馬力係数が最小となる浮心前後位置は造波抵抗係数が最小となる浮心前後位置に比べてマイナス寄り(船首寄り)になっています。これは、主に、方形係数が小さい船型では形状影響係数の影響、方形係数が大きい船型では自航要素の影響です。

6.5 c_Pカーブの比較

本項では、c_Pカーブを変えたとき馬力係数がどの程度変化するかの例を示します。図-33(C_B=0.60)、34(C_B=0.80)がそれで、(1)は馬力係数の等高線です。ただし、馬力係数そのものではなく、馬力係数の最小値に対して2%増(点線)と5%増(破線)の馬力係数の等高線を示しています。図中の○印が、馬力係数が最小となる点(min.C_{SF}、min.l_{CB})です。(2)、(3)は、○印を通る横軸、縦軸に平行な直線上の馬力係数で、(2)は浮心前後位置がl_{CB}=min.l_{CB}の直線上の馬力係数、(3)は船体前半部肩張り度がC_{SF}=min.C_{SF}の直線上の馬力係数です。馬力係数の最小値に対して2%増、5%増の点を□印、△印で示してあります。(1)にも対応する点を示してあります。(4)～(7)はこれらの点に対応するc_Pカーブです。(4)、(5)は船体前半部肩張り度が同一(min.C_{SF})で浮心前後位置を変えた場合のc_Pカーブの比較で、実線は○印の点のc_Pカーブ、点線は□印の馬力係数が2%増のc_Pカーブ、破線は△印の5%増のc_Pカーブです。(6)、(7)は、浮心前後位置が同一(min.l_{CB})で船体前半部肩張り度を変えた場合のc_Pカーブの比較です。線種の意味は(4)、(5)の場合と同じで、実線は(4)、(5)と同じ線です。船体後半部の肩張り度は一定値(1.02ないし1.01)ですので、(6)では3本のc_Pカーブが重なっています。

これらの図から、c_Pカーブの違いと馬力係数の違いとの定量的関係が分かります。同一馬力増に対するc_Pカーブの違いは、浮心前後位置を変えた場合に比べて、肩張り度を変えた場合に小さくなっています。

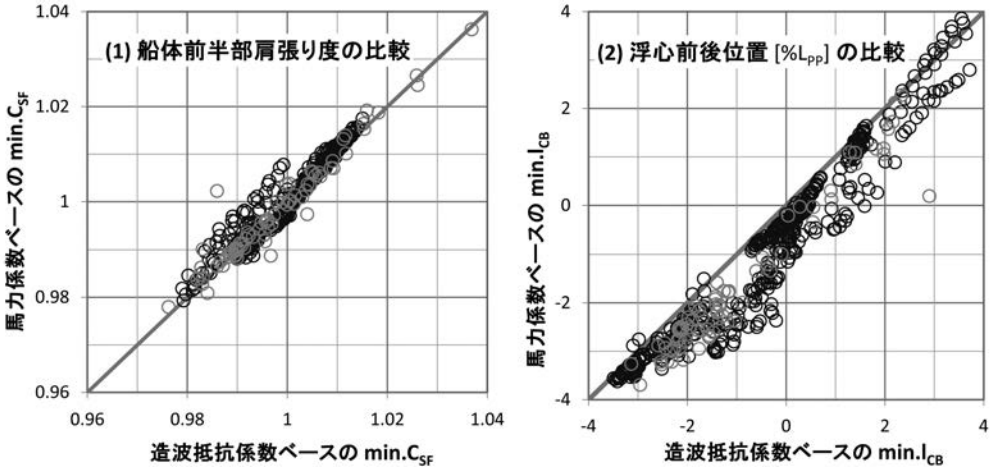


図-32　造波抵抗係数ベースと馬力係数ベースの比較
(計画満載状態、設計フルード数、C_{SA}=1.05-0.05C_B)

肩張り度は、船舶の重心前後位置との整合性が不要で、選択の自由度が比較的大きいと考えられますが、最適値からの僅かの違いで馬力増を招いてしまうので注意が必要です。特に、前号（SRC News No.93、図-30（1））でも示したように、方形係数が0.80の船型で船体前半部肩張り度が大きく浮心前後位置が小さい領域で馬力係数が急増しています。

6.5 フルード数の影響

本項では、方形係数が同一でフルード数を変えた場合に、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度や浮心前後位置がどのように変化するかを示します。

図-35は方形係数が0.60、図-36は方形係数が0.80の船型の例です。ここでは、フルード数の違いを明確にするため、実際の船型で採用されるであろうフルード数に比べて広範囲のフルード数での変化を示してあります。（1）は船体前半部肩張り度を横軸、浮心前後位置を縦軸とする馬力係数の等高線です。（2）、（3）は船体前半部肩張り度ベース、浮心前後位置ベースの馬力係数です。図-33、34と同じ形式で、異なるフルード数の性能を重ねて示してあります。（1）では、各フルード数で馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置の点（min.C_{SF}、min.l_{CB}）を○印等で示し、この各フルード数における最小値min.p' の2%増の値を等高線で示しています。これらの○印等に対応する点を、（2）、（3）でも同じ○印等で示してあります。（4）は各フルード数で馬力係数が最小となる船型（min.C_{SF}、min.l_{CB}）に対応するc_Pカーブです。線が重なって区別が難しいので、（1）等に示した○印等と同じ記号を付して線を区別してあります。（5）、（6）は（4）の局部的拡大図です。

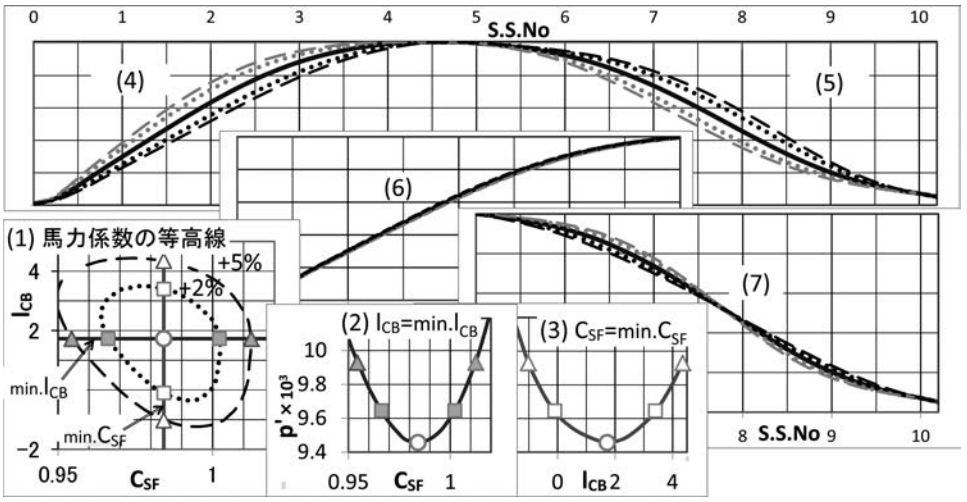


図-33　c_Pカーブの比較
C_B=0.60 F_n=0.25 C_{SA}=1.02

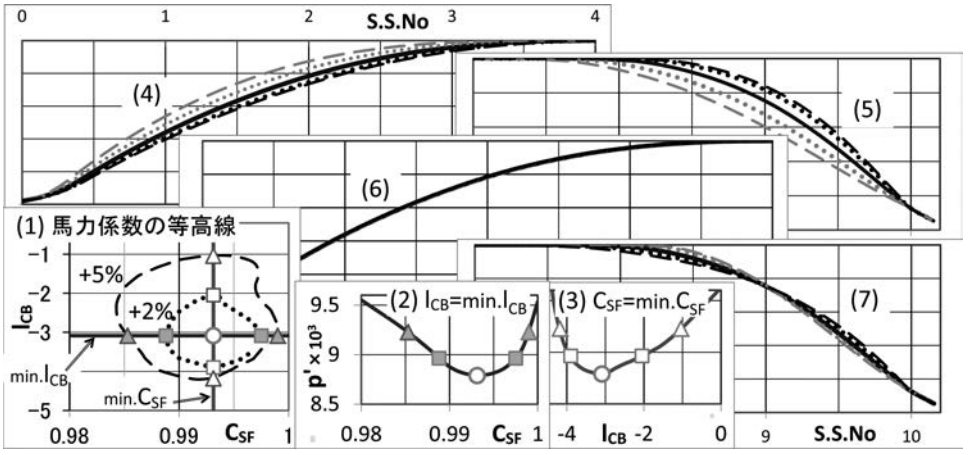


図-34　c_Pカーブの比較
C_B=0.80 F_n=0.18 C_{SA}=1.01

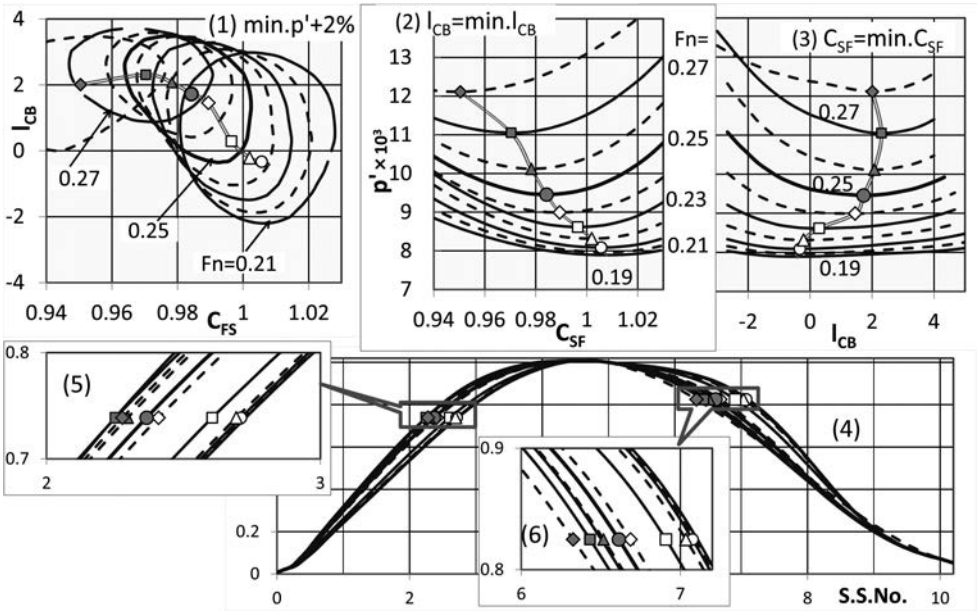


図-35　フルード数の影響
C_B=0.60 , C_{SA}=1.02

フルード数が大きくなると最適な浮心前後位置がプラス側（船尾側）に移動しています。ただし、方形係数が0.60の船型では、高フルード数領域における変化が小さくなっています。最適な船体前半部肩張り度は、方形係数が0.60の船型では、フルード数が大きくなるに伴い小さく（肩落ち）なっていますが、方形係数が0.80の船型では微増となっています。

方形係数が0.60の船型の等高線で、フルード数が大きくなるに伴い馬力2%増の等高線が囲む領域が狭くなっています。これは、高フルード数領域では、浮心前後位置や船体前半部肩張り度の選定により多くの注意が必要であることを示しています。方形係数が0.80の船型では、この傾向は明確ではありませんが、馬力係数が最小となる点からみて、浮心前後位置がマイナス側（船首側）の方向、および船体前半部肩張り度が大きく（肩張り）なる方向で馬力係数が急増しています。これは、前号でも記述しましたが、造波抵抗の急増に起因します。

各フルード数において馬力係数が最小となるc_Pカーブを見ると、浮心前後位置の違いが目立ち、船体前半部肩張り度の違いは小さく見えます。これは、図-33、34にも示したように船体前半部肩張り度によるc_Pカーブの違いは小さく見えても、その影響は大きいことを示している、とも言えます。

最後に、図-37は、図-32の場合と同様のいろいろな船型に関して、フルード数を変えて、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度min.C_{SF}と浮心前後位置min.l_{CB}を求めた結果です。同一船型のデータを線で結んでいます。□印は各船型の設計フルード数です。船体後半部肩張り度は、図-32の場合と同様で、実績から求めた平均的な値としました。フルード数を変えた場合の船体前半部肩張り度等の変化の様子がフルード数によって異なっています。図-37の(3)、(4)は、各船型の設計フルード数付近の傾斜を示した図です。これらの図から、設計フルード数の低い船型（タンカーやバルクキャリア等の方形係数の大きい船型）では、設計フルード数を変えた場合、船体前半部肩張り度を変える必要がないことが分かります。方形係数の大きい船型では船体前半部c_Pカーブの自由度が少ないので、船体前半部肩張り度を変える必要がないのは幸いです。他方、方形係数の小さい設計フルード数の高い船型においては、設計フルード数を大きくする場合には船体前半部肩張り度を小さく（肩落ちに）する必要があることが分かります。また、多くの船型では、従来言われているように、設計フルード数を大きくする場合には、浮心前後位置を大きく（船尾側に移動）する必要があることを示していますが、高いフルード数(F_n=0.25)の船型では逆の傾向の船型も多くなっています。　（技術顧問　佐藤和範）

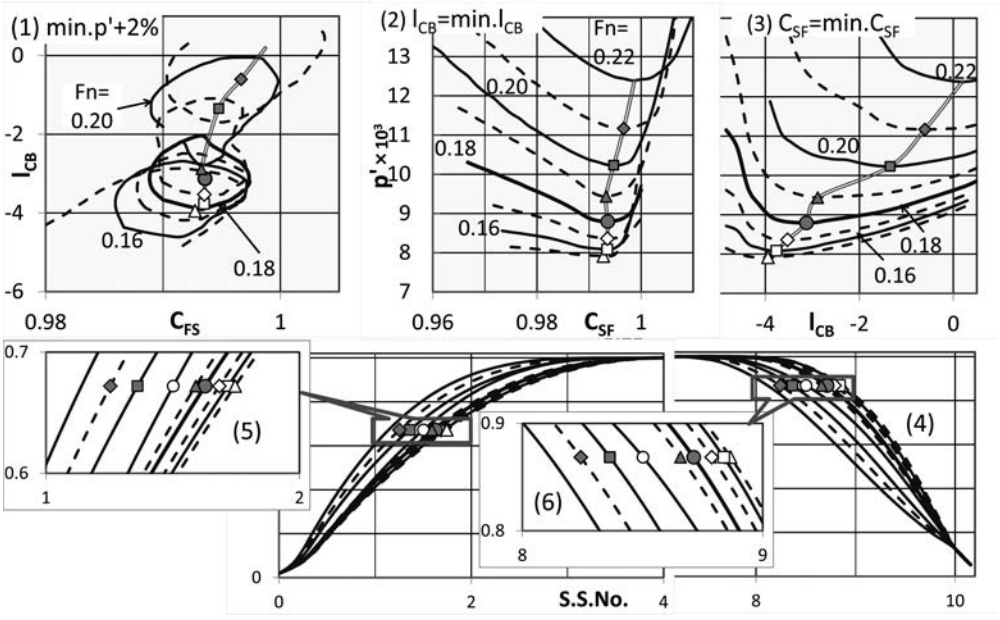


図-36　フルード数の影響 C_B=0.80，C_{SA}=1.01

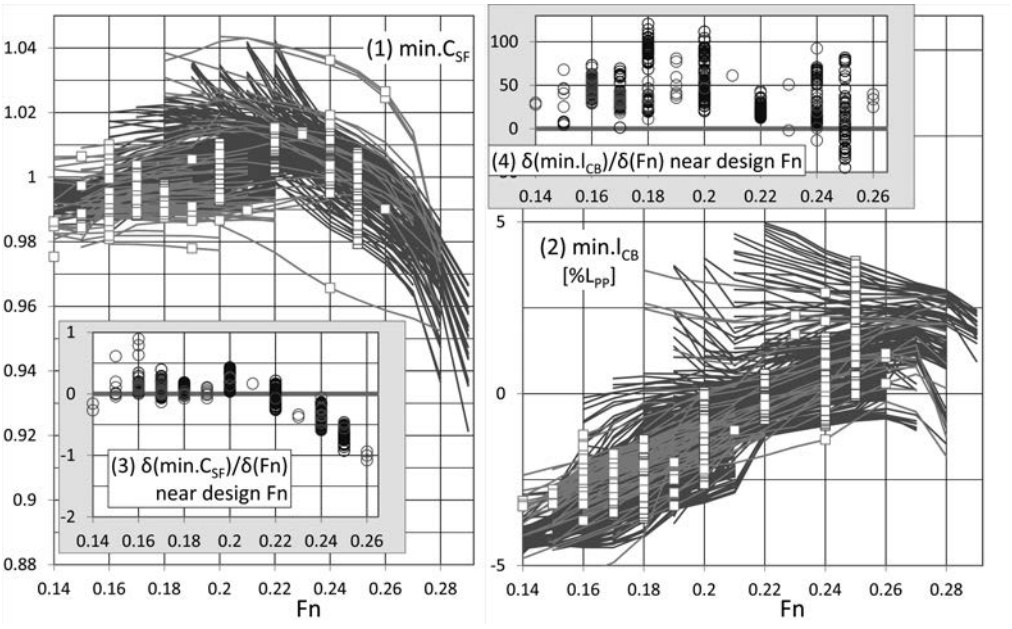


図-37　馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置（計画満載状態、C_{SA}=1.05-0.05C_B）

SRC資料室(15)

最適船型(その6)

最適浮心前後位置と最適肩張り度に関する前号からの続きです。

6.7 方形係数の影響

本項では、フルード数が同一で方形係数のみを変えた場合に、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度や浮心前後位置がどのように変化するか、を示します。なお、本号でも、前号までと同様、日本造船技術センターで実施した水槽試験結果を利用して求めた造波抵抗係数等に関する回帰式によって馬力係数を推定しました。

図-38はフルード数が0.25の船型の例です。これは方形係数が0.60の船型を原型に、ステーション移動法で方形係数を増減させた上で、更に、ステーション移動法で浮心前後位置や肩張り度を変更して求めました。船体後半部肩張り度は実績から求めた平均的な値(C_{SA}=1.05-0.05C_B)としました(以下、同様)。本図の(1)は船体前半部肩張り度、浮心前後位置を横軸、縦軸とした場合の馬力係数を示します。○印等は馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置(min.C_{SF}、min.l_{CB})を、等高線は最小馬力係数に対して2%増となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置を示します。5個の方形係数に対する馬力係数を示してあります。(2)は、浮心前後位置を各方形係数において馬力係数が最小となる浮心前後位置に固定して船体前半部肩張り度を変更した場合の馬力係数の変化を示します。(3)は同様に各方形係数で船体前半部肩張り度を固定して浮心前後位置を変更した場合の馬力係数です。この例では、方形係数を大きくするに伴い船体前半部肩張り度が大きく(肩張り)なっていますが、馬力係数が最小となる浮心前後位置はほとんど変化していません。

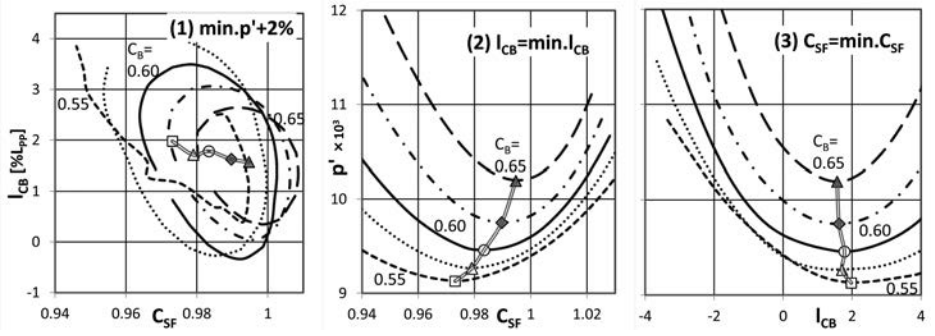


図-38　方形係数を変更した場合の馬力係数、フルード数=0.25の船型の例

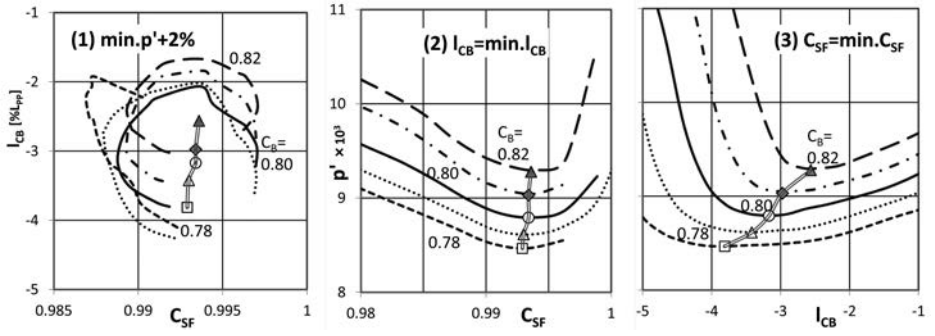


図-39　方形係数を変更した場合の馬力係数、フルード数=0.18の船型の例

図-39はフルード数が0.18の船型の例です。これは、方形係数が0.80の船型を原型に、前記の場合と同じ手順で求めました。図の形式も同じです。この例では、方形係数を変更しても船体前半部肩張り

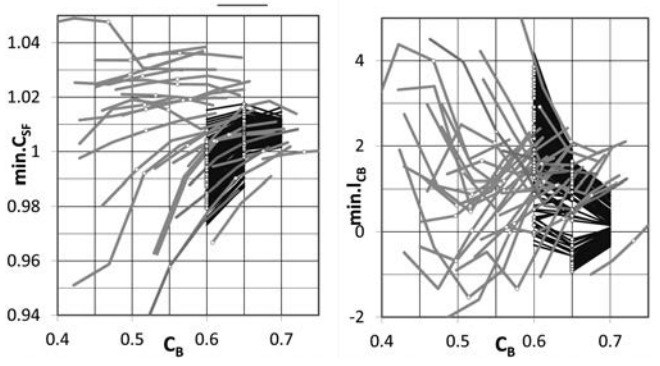


図-40　設計フルード数が 0.24～0.26 の船型

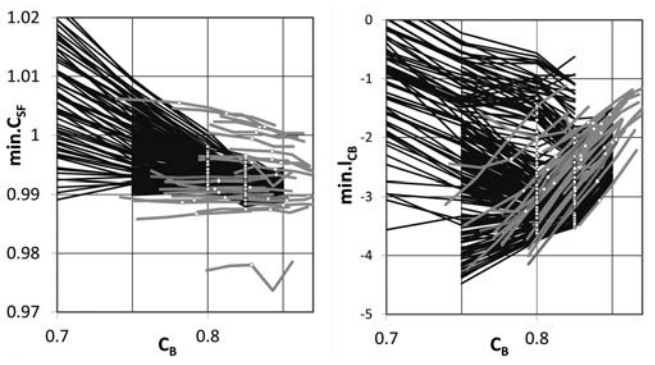


図-41　設計フルード数が0.17～0.19の船型

度はほとんど変化しませんが、方形係数を大きくすると浮心前後位置が大きく（船尾側に移動）なっています。この例では、船体前半部肩張り度を大きくした船型、浮心前後位置を小さく（船首側に移動）した船型で馬力係数が急増していますが、これは造波抵抗係数の急増に起因します。この例のように、低いフルード数でも船体前半部肩張り度を大きくしたり、船体前半部を過度に太らせたりしますと造波抵抗係数が急増し、馬力係数が大きくなってしまいます。

図-40は、設計フルード数が高い痩せ型船型で、方形係数を変更した場合の船体前半部肩張り度、浮心前後位置の変化を示します。左図は方形係数を変更した場合に馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度を線で結んだ図で、右図は浮心前後位置の変化を示す図です。計算手順は前記の例と同じです。方形係数の変更に伴い、船体前半部肩張り度は比較的単調に変化していますが、浮心前後位置の変化がギクシャクしています。図-41は、同じく設計フルード数の低い肥大船型の例です。馬力係数を最小とする船体前半部肩張り度が単調に減少する船型と余り変化しない船型があります。浮心前後位置では、方形係数が0.80付近を境に様子が異なっているように見えます。すなわち、方形係数が0.80より小さい船型では単調減少の船型が多く、0.80より大きい船型ではほとんどが単調増加となっています。

図-42は、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置が方形係数変更に伴いうどのように変化するかを示す図で、方形係数の差分と馬力係数を最小とする船体前半部肩張り度等の差分との比を、船の長さ幅比、幅喫水比、原型の方形係数、設計フルード数をベースに示した図です。本図によると、船体前半部肩張り度の場合、設計フルード数が0.25前後で方形係数が0.5～0.6の船型では、多くの船型で比がプラス、すなわち、方形係数を大きくすると船体前半部肩張り度が大きく（肩張り）なる船型の多いことが分かります。他方、設計フルード数が0.15～0.2で方形係数が0.7～0.85の船型では比がマイナスとなる船型が多くなっています。また、浮心前後位置の場合は、高フルード数の痩せ型船では0ないしマイナス側、低フルード数の肥大船型ではほとんどの船型でプラスとなっています。

船の長さ幅比、幅喫水比の影響も多少は認められますが、方形係数やフルード数の影響に比べて小さくなっています。何れにしても、点のばらつきが大きくなっています。馬力係数の推定誤差、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度や浮心前後位置を求める際の誤差、その差分を求める際の誤差等、図-42でのばらつきは、これらの誤差の累積にも因ると考えられますが、フレームラインや船首バルブ等、より微細な船型の違いに起因するものも大きいと考えられます。

図-39の（3）や図-41の右図に示すように、方形係数の大きい船型の浮心前後位置は、方形係数を大きくすると馬力係数を最小にする浮心前後位置がプラス側（船尾側）になっています。同じことですが、図-42の下段図を見ると、低フルード数の肥大船型ではほとんどの船型で差分比がプラスとなっています。これは、方形係数を増加させる際、船体前半部の方形係数を後半部と同程度に増加させることによる造波抵抗急増を防ぐためです。図-43には、馬力係数が最小となる浮心前後位置に対応する船体前半部方形係数C_{BF}、後半部方形係数C_{BA}を示します。方形係数を変更した船型を折れ線で結んであります。本図から、方形係数が大きい船型で馬力係数を最小にしようとする際、造波抵抗係数の急増を防ぐため、船体前半部方形係数C_{BF}には限界（C_{BF}=0.95程度、浮心前後位置では−4%L_{PP}程度）があり、形状影響係数の増加や自航要素の悪化があるとしても、船体後半部の肥大化で補わざるを得ないことが分かります。

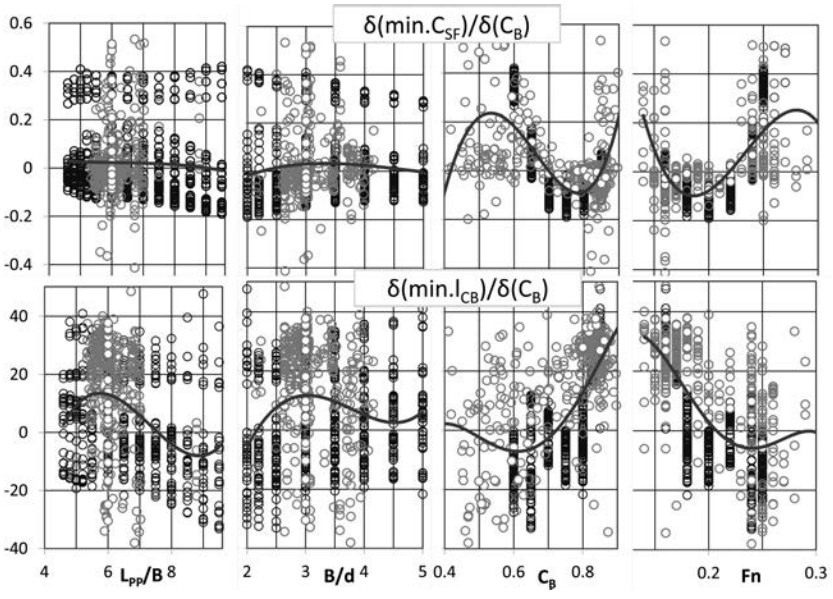
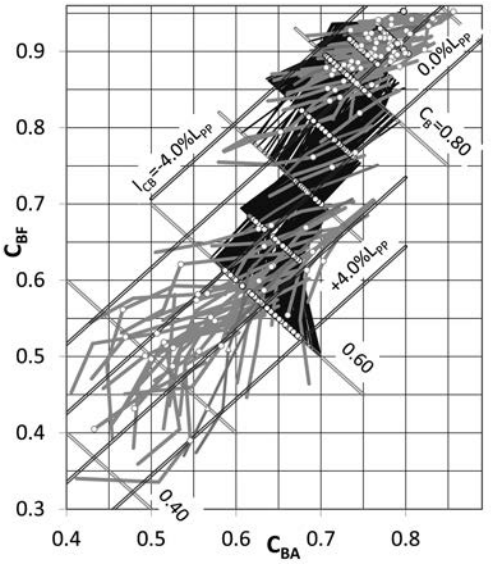


図-42　馬力係数を最小にする船体前半部肩張り度、浮心前後位置の方形係数変更による変化



図−43 馬力係数が最小となる浮心前後位置に対応する船体後半部、前半部の方形係数

6.8 長さ幅比、幅喫水比の影響

本項では、方形係数やフルード数が同一で、船の長さ幅比や幅喫水比を変えた場合に、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度や浮心前後位置がどのように変化するかを示します。原型のフレームラインを横方向、喫水方向に伸縮した船型に関して、ステーション移動法で浮心前後位置や肩張り度を変更して求めました。

図-44、45は長さ幅比、幅喫水比を変更した船型の馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置です。横軸は各々長さ幅比、幅喫水比で、長さ幅比、幅喫水比を変更した船型を線で結んであります。また、図-46、47には図-44、45に示した線の傾斜を幅喫水比（または、長さ幅比）、方形係数、設計フルード数ベースで示しました。

長さ幅比を変更する場合、図-44から、馬力係数を最小にする船体前半部肩張り度や浮心前後位置は、大凡、右上がりの傾向、すなわち、長さ幅比を大きくすると船体前半部肩張り度、浮心前後位置を大きく（肩張り側、浮心前後位置を船尾側）する必要のあることが分かります。ただし、図-46によりますと、それは高フルード数の痩せ型船の場合に顕著で、低フルード数の方形係数が大きい船型では差分の小さいことが分かります。

幅喫水比を変更した場合は、図-45から、馬力係数を最小にする船体前半部肩張り度は右上がりの傾向ですが、浮心前後位置の場合は逆に右下がりになっています。ただし、図-47によりますと、長さ幅比の場合と同様、それは高フルード数の痩せ型船の場合に顕著で、低フルード数の方形係数が大きい船型の差分比（絶対値）は小さいことが分かります。

長さ幅比を変更した場合、幅喫水比を変更した場合、何れにおいても、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度や浮心前後位置は、幅喫水比や長さ幅比による変化は小さいようです。

（技術顧問　佐藤和範）

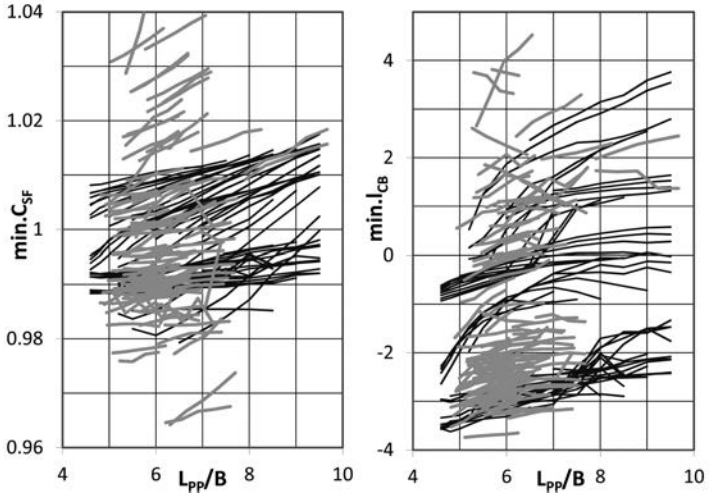


図-44　長さ幅比を変更した場合の船体前半部肩張り度、浮心前後位

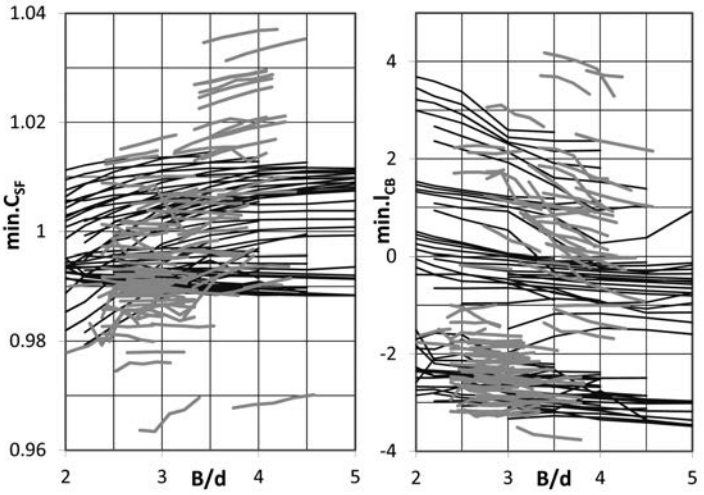


図-45　幅喫水比を変更した場合の船体前半部肩張り度、浮心前後位置

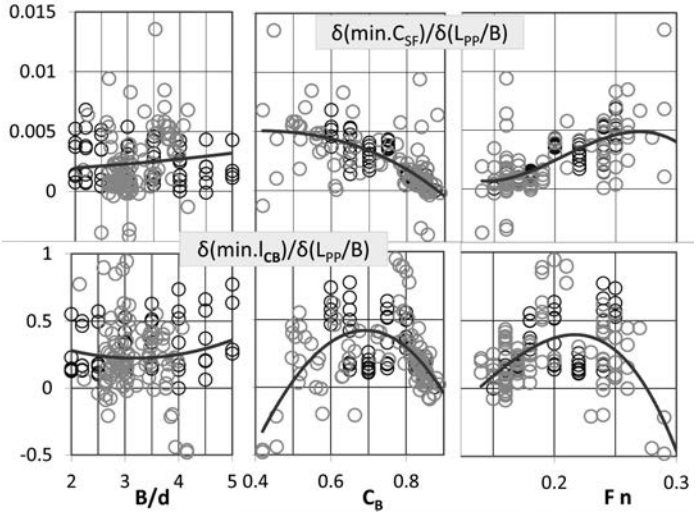


図-46　長さ幅比を変更した場合の傾斜

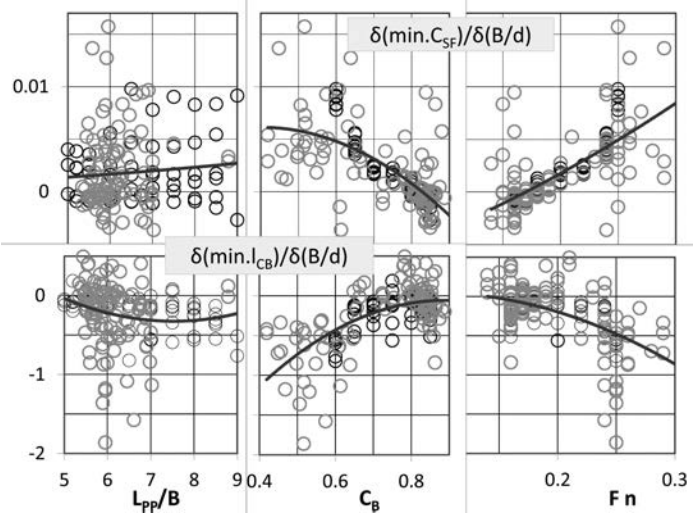


図-47　幅喫水比を変更した場合の傾斜

SRC資料室(16)

最適船型(その7)

6.9 最適肩張り度、最適浮心前後位置のフルード数、方形係数等による変化

最適肩張り度、最適浮心前後位置に関する検討の最後として、本項では、馬力係数等が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置がフルード数、方形係数、長さ幅比、幅喫水比、船体後半部肩張り度によってどのように変化するかを示します。

(1)馬力係数が最小となるフルード数、方形係数

図-48には馬力係数(伝達馬力の無次元係数)が最小となる船体前半部肩張り度C_{SF}を示します。前号までに示した様々な船型の馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度をフルード数Fn、方形係数C_B、長さ幅比L_{PP}/B、幅喫水比B/d、船体後半部肩張り度C_{SA}の多項式で近似した結果です。上段の図はフルード数、方形係数を横軸、縦軸とした船体前半部肩張り度の等高線です。中段、下段の図はフルード数、方形係数を横軸とした図で、代表的な方形係数、フルード数についての船体前半部肩張り度を示してあります。船の長さ幅比はL_{PP}/B=6.0、幅喫水比はB/d=3.0です。また、船体後半部肩張り度は実績の平均的な値(C_{SA}=1.05-0.05C_B)としました。

本図によると、方形係数の小さい船型領域では、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度はほぼフルード数によって決まること、そしてフルード数が高い船型では船体前半部肩張り度を小さくする(肩落ちにする)必要があることが分かります。他方、方形係数が大きい船型領域では、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度はほぼ方形係数によって決まり、フルード数に依る違いの小さいことが分かります。

次に、馬力係数が最小となる浮心前後位置を図-49に示します。船体前半部肩張り度と同じ手順で求めました。図の形式も図-48と同じです。本図によると、全体としては、フルード数の影響と方形係数の影響が同程度であることが分かります。方形係数を小さくした船型、あるいは設計フルード数の高い船型では浮心前後位置をプラス側(船尾側)に移動する必要があります。ただし、方形係数の大きい船型領域では、フルード数の影響が顕著で、設計フルード数の低い船型では浮心前後位置をマイナス側(船首側)に移動する必要のあることが分かります。ただし、C_B=0.80付近で浮心前後位置が最小となり、それより大きい方形係数の船型では、逆に浮心前後位置をプラス側(船尾側)に移動する必要があります。これは、前号の6.7で記述しましたように、方形係数の大きい船型領域では、低フルード数とは言えども、船体前半部方形係数の増加に伴う造波抵抗増が著しく、方形係数を増加させる際、ある程度は船体後半部方形係数の増加で負担せざるを得ないことを示しています。

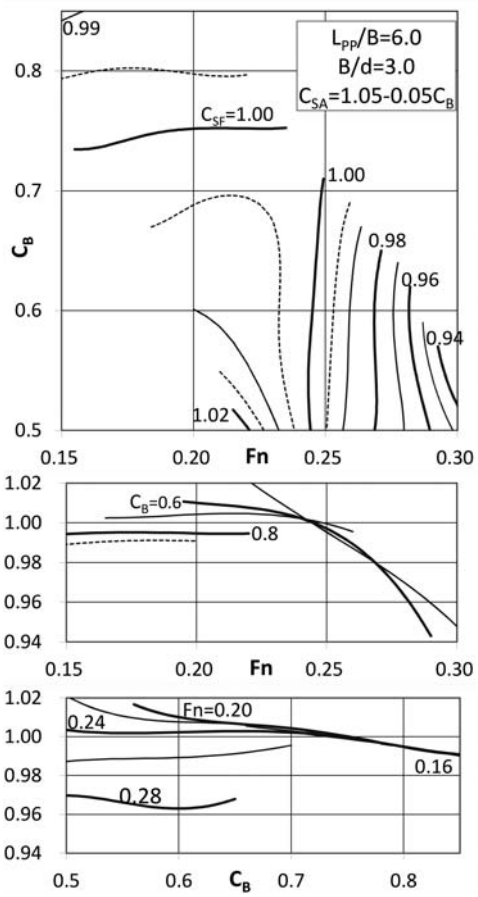


図-48 馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度

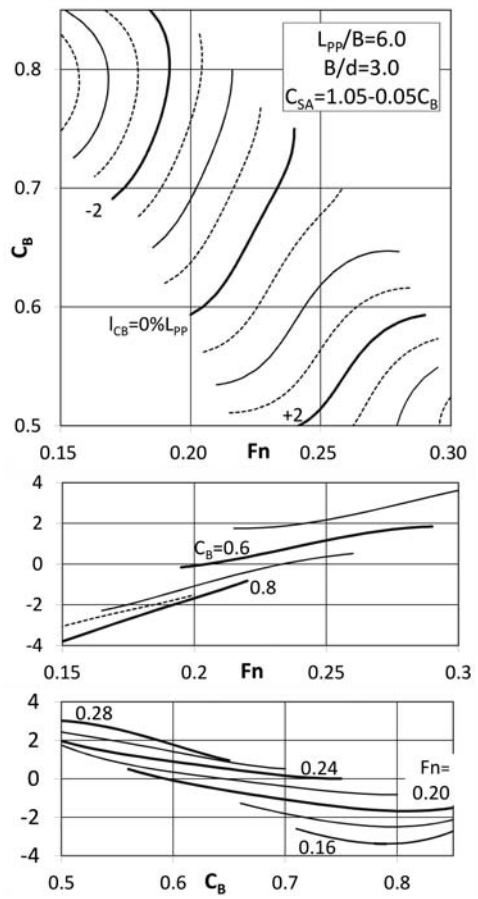


図-49 馬力係数が最小となる浮心前後位置

(2) 造波抵抗係数ベース、全抵抗係数ベース

前項では、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置を示しましたが、ここでは、造波抵抗係数や全抵抗係数が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置と比較します。

図-50に、3種の船体前半部肩張り度に関する等高線を示します。点線は造波抵抗係数が最小となる船体前半部肩張り度、一点鎖線は全抵抗係数が最小となる船体前半部肩張り度の等高線です。実線は図-48に示した馬力係数の等高線です。上段には二重線（方形係数と設計フルード数の平均的関係）上の船体前半部肩張り度もフルード数ベースで示しました。

本図によると、通常の設計フルード数付近では、造波抵抗を最小とする船体前半部肩張り度、全抵抗を最小とする船体前半部肩張り度、伝達馬力を最小とする船体前半部肩張り度には大差無いことが分かります。それより離れたフルード数では差が大きくなりますが、その差は僅かです。これは、造波抵抗が主に船体前半部のcpカーブで決まり、かつ、船体前半部のcpカーブが形状影響係数や自航要素に及ぼす影響が小さいので、造波抵抗の優劣が全抵抗や伝達馬力にも引き継がれることを示していると考えられます。

図-51には3種の浮心前後位置に関する等高線を示します。形式は図-50と同じです（以下、同様）。

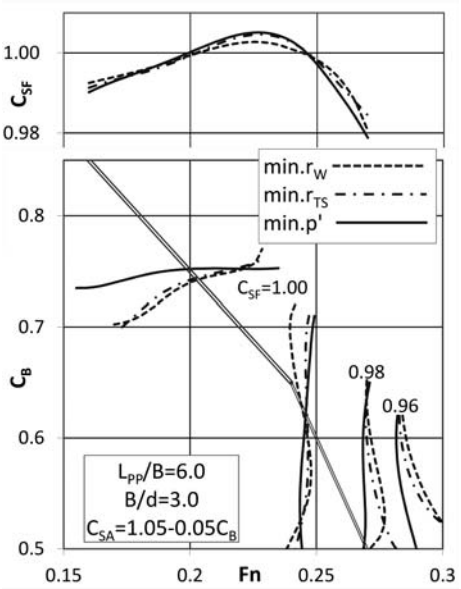


図-50 造波抵抗係数、全抵抗係数、馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度の比較

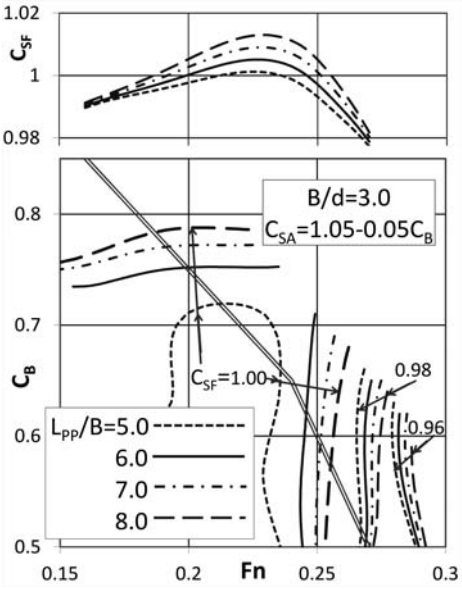


図-52 馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度への長さ幅比の影響

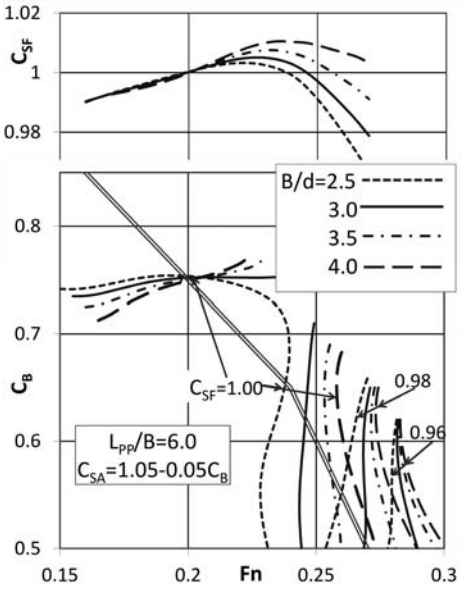


図-54 馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度への幅喫水比の影響

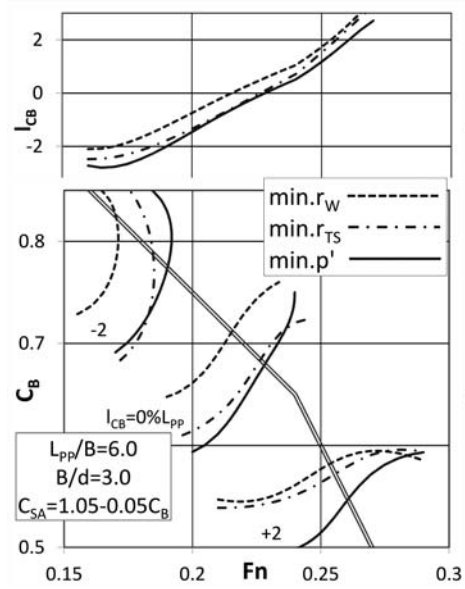


図-51 造波抵抗係数、全抵抗係数、馬力係数が最小となる浮心前後位置の比較

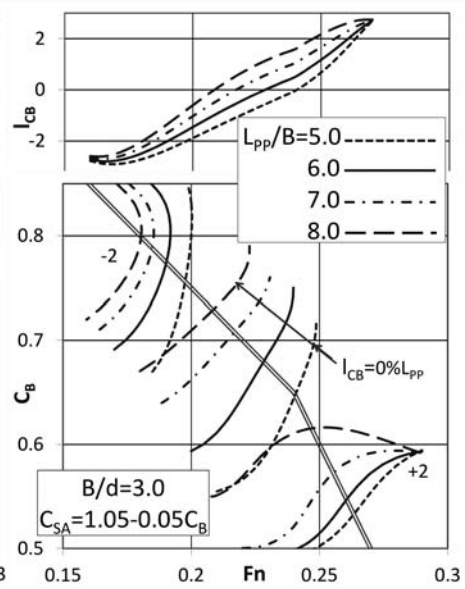


図-53 馬力係数が最小となる浮心前後位置への長さ幅比の影響

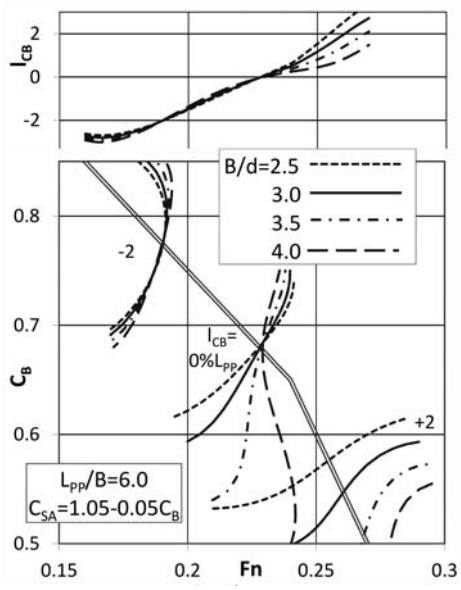


図-55 馬力係数が最小となる浮心前後位置への幅喫水比の影響

本図によると、造波抵抗係数を最小とする浮心前後位置と馬力係数を最小とする浮心前後位置とにはほぼ一定の違いが有ります。前者については、極小造波抵抗理論等で従来から研究されてきましたが、伝達馬力を最小とする浮心前後位置は、造波抵抗を最小とする浮心前後位置に対して、0.5%L_{PP}程度船首側に移動する必要があります。これは、浮心前後位置を船首側に移動すると馬力係数を構成する形状影響係数や自航要素が改善されることに因ります。

(3) 長さ幅比、幅喫水比の違い

図-52に船の長さ幅比を変えた場合の船体前半部肩張り度の変化を示します。船の長さ幅比を4種(L_{PP}/B=5.0, 6.0, 7.0, 8.0)変えていますが、長さ幅比を大きくする場合、船体前半部肩張り度を大きく(肩張りに)する必要のあることが分かります。その量は、中程度のフルード数、方形係数で大きくなっています。図-53は、浮心前後位置の変化ですが、長さ幅比を大きくする場合、浮心前後位置をプラス側(船尾側)に移動する必要のあることが分かります。この場合も、その量は、中程度のフルード数、方形係数で大きくなっています。

図-54に船の幅喫水比を4種(B/d=2.5, 3.0, 3.5, 4.0)変えた場合の船体前半部肩張り度の変化を示します。本図から、設計フルード数が低く方形係数の大きい船型領域では幅喫水比の影響は比較的小さいのですが、設計フルード数が高く方形係数の小さい船型領域では幅喫水比を大きくする場合、船体前半部肩張り度を大きく(肩張りに)する必要のあることが分かります。図-54は、浮心前後位置の変化ですが、船体前半部肩張り度の場合と同様、低フルード数の方形係数の大きい船型領域では幅喫水比の影響は比較的小さいのですが、高フルード数の方形係数の小さい船型領域では幅喫水比を大きくする場合、浮心前後位置をマイナス側(船首側)に移動する必要のあることが分かります。

(4) 船体後半部肩張り度の違い

船体後半部肩張り度を変更した場合の馬力係数が最小となる浮心前後位置の変化を図-56に示します。なお、船体前半部肩張り度に関しては、船体後半部肩張り度の影響が小さいので省略します。

本図によると、船体後半部肩張り度を大きく(肩張りに)した場合、馬力係数を最小にするためには、浮心前後位置をマイナス側(船首側)に移動する必要があることが分かります。

(5) 回帰式の残差

以上、馬力係数等が最小となる船体前半部肩張り度、浮心前後位置がフルード数、方形係数、長さ幅比、幅喫水比、船体後半部肩張り度によってどのように変化するかを示しましたが、その船体前半部肩張り度等はフルード数や方形係数等の主要寸法だけで決まる訳ではありません。より微細なcpカーブの形状、フレームライン形状、船首バルブ形状等によっても変わります。

参考のため、図-57に図-48以下の図の作成に使用した船体前半部肩張り度を推定するための多項式(回帰式)による推定値と基になった船体前半部肩張り度との比較を示します。図-58は浮心前後位置に関する比較です。これらの図の縦軸の値と横軸の値との違いには、各船型の各推進性能要素の推定誤差、馬力係数等が最小となる船体前半部肩張り度等を求める際の誤差、それらを多項式で近似する際の誤差が含まれていますが、馬力係数等が最小となる船体前半部肩張り度等をフルード数と主要寸法比の多項式で表すことによる誤差も大きいと考えられます。何れにしても、図-48～56に示した最適肩張り度、最適浮心前後位置には図-57、図-58に示した誤差(標準偏差は船体前半部肩張り度では0.011、浮心前後位置では0.69%L_{PP})が含まれています。

(技術顧問　佐藤 和範)

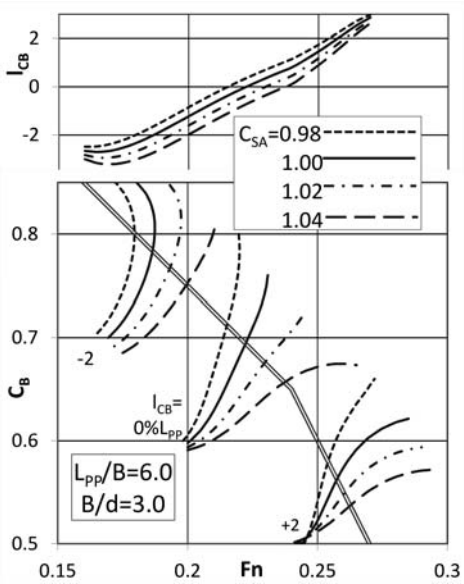


図-56 馬力係数が最小となる浮心前後位置への船体後半部肩張り度の影響

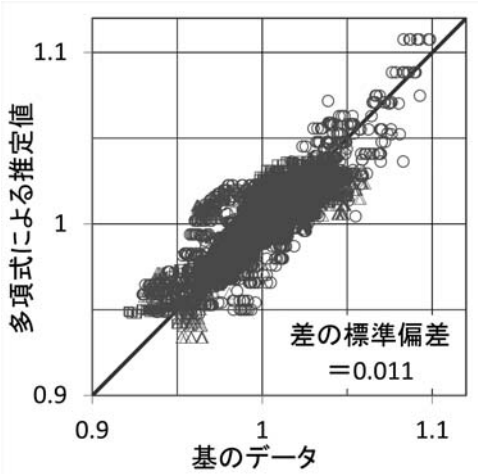


図-57 馬力係数が最小となる船体前半部肩張り度の基のデータと多項式による推定値の比較

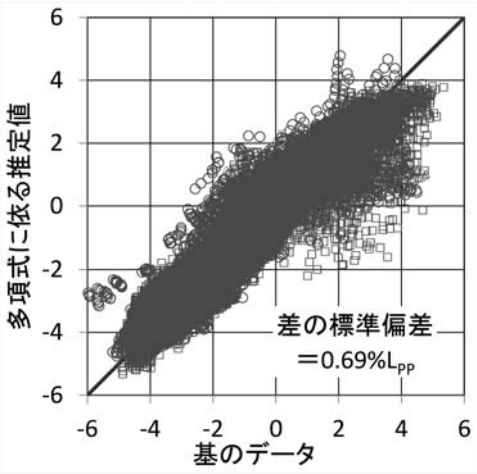


図-58 馬力係数が最小となる浮心前後位置の基のデータと多項式による推定値の比較