SRC資料室

（8）　推進性能と相関　（その１）

本号では、推進性能の基本的要素である抵抗係数（造波抵抗係数、粘性抵抗係数）と自航要素（船後プロペラ効率比、スラスト減少係数、有効伴流係数）の船型要素のレベルとの相関、性能要素間の相関、推進性能の最終的評価である馬力係数との相関について紹介します。

1．船型要素のレベルとの相関

船型を表す要素は、主寸法からフレームラインやウォーターライン等まで各種のレベルがありますが、船の推進性能に及ぼす影響が大きいのは、どのレベルの船型要素でしょうか。

図－１は、推進性能要素を目的変数とする回帰式において、説明変数として使用する船型要素のレベルを変えた場合の残差の標準偏差を示した図です。回帰式は日本造船技術センターで実施した水槽試験結果を使用して求めました。各レベルにおける船型要素を表－１に示します。レベル０とは、船型要素が何も与えられていない場合で、この場合の性能推定値は平均値です。また、たとえば、レベル２における残差は、水槽試験の計測誤差や回帰式の不完全さに因る誤差以外に、レベルが３以上の船型要素の影響を無視したことによる推定誤差が含まれています。

図－１を見ますと、造波抵抗係数、粘性抵抗係数、有効伴流係数ではレベルが０から１になる段階で残差が急減しています。これは、これらの性能要素は船の主寸法比に大きく左右されることを示しています。

造波抵抗係数の場合、レベル３から４への変更で比較的大きく残差が減少しています。これは、造波抵抗係数では、CPカーブ、CWカーブの影響も大きいことを示しています。有効伴流係数の場合、レベル２から３への変更およびレベル４から５への変更で比較的大きく残差が減少しています。これは、有効伴流係数では、浮心前後位置等およびフレームライン等の影響も比較的大きいことを示しています。船後プロペラ効率比の残差はそもそも小さいのですが、船型要素のレベルを高くしても、残差はあまり減少しません。

図－１には、参考のため、馬力係数の推定残差も示してあります。馬力係数は推進に必要な伝達馬力の無次元値で、抵抗係数と自航要素から算出される従属的係数ですが、船型要素のレベルによる残差の変化の様子は造波抵抗係数に似ています。

2．性能要素間の相関

表－２には、基本的推進性能間の相関係数を示します（馬力係数p' との相関係数については後述）。レベル０とは船型要素が何も与えられていない場合で、実験結果そのもの（r_W等）の相関係数です。レベル２とは、レベル２の船型要素による回帰式で推進性能を推定した場合の残差（δr_W等）の相関係数です。相関が比較的大きい組み合わせのカラムは網みがけしてありますが、その場合の個々の船型のデータを図－２、図－３に示します。これらの図では２種の方形係数C_Bの範囲のデータを△、□印で区別してあります。計画速力付近のデータを示してあります

表－１　船型要素のレベル

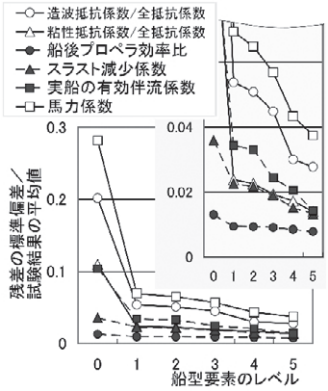
レベル	船型要素	
0	無し（平均値を性能推定値とする）	
1	長さ、幅、喫水、排水量、計画満載状態に対する排水量比	回帰式
2	＋ トリム、プロペラ直径	回帰式
3	＋ 浮心前後位置、水線面積係数	回帰式
4	＋ CPカーブ、CWカーブ	回帰式
5	＋ フレームライン、ウォーターライン、船首尾プロファイル	回帰式

表－２　船型要素間の相関係数

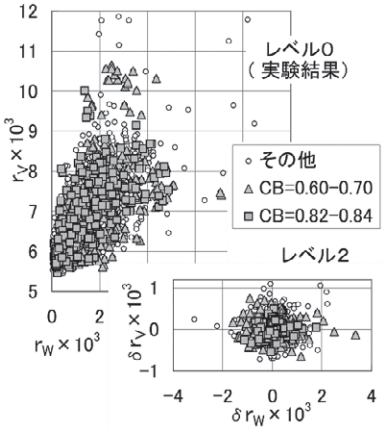
造波抵抗係数	r_W					0.91										0.86
粘性抵抗係数	r_V	0.62				0.85										0.34
船後プロペラ効率比	η_R	0.10	−0.11			−0.02										−0.15
スラスト減少係数	1−t	0.04	−0.11	−0.01		−0.08										−0.14
有効伴流係数	$1-w_{TS}$	0.04	−0.22	0.15	0.69	−0.07										−0.09
		r_W	r_V	η_R	1−t	p'										p'

（実験結果）　レベル０

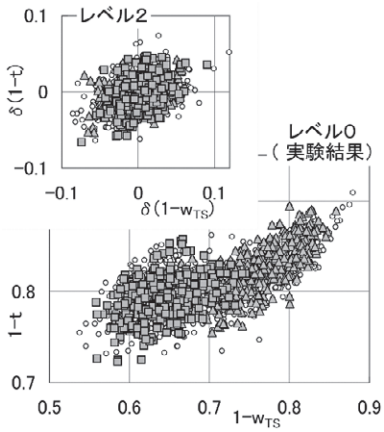
（残差の相関係数）　レベル２



図－１　回帰式推定残差



図－２　造波抵抗係数と馬力係数



図－３　有効伴流係数とスラスト減少係数

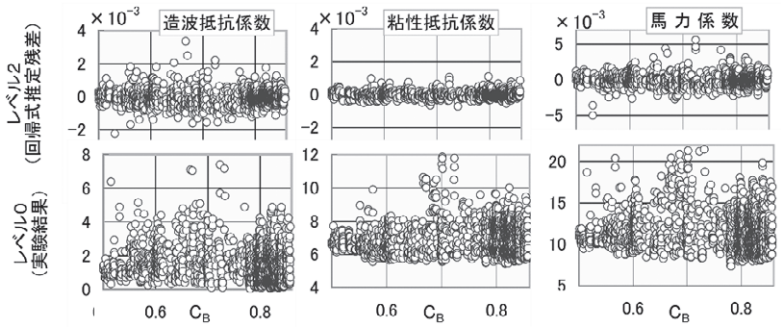
が、計画満載状態以外の載貨状態については、満載状態の馬力に対応する速度での性能を示してあります。

これらの図表によりますと、レベル0（実験結果）では、造波抵抗係数と粘性抵抗係数の相関が大きくなっています。これは、造波抵抗係数が大きい船型では粘性抵抗係数も大きいことを示しています。ただし、レベル2の推定残差の相関係数が小さいことから、上記の相関はレベル2以下の船型要素に起因するもので、浮心前後位置等のレベル3以上の船型要素の影響は小さいことを示しています。有効伴流係数とスラスト減少係数の相関係数は、レベル0で大きくなっていますが、これは、肥えた船型では有効伴流係数とスラスト減少係数がともに小さく、痩せた船型ではともに大きいことを示しています。この場合は、レベル2の推定残差でもある程度の相関がありますが、これは、例えば、「有効伴流係数が大きくなるようなレベル3（浮心前後位置等）以上の船型要素を有する船型では、スラスト減少係数も大きい」ということを示しています。

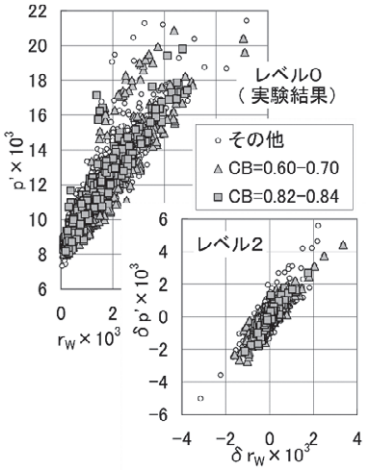
3. 馬力係数との相関

表－2には馬力係数との相関係数も示しましたが、造波抵抗係数や粘性抵抗係数との相関が大きくなっています。図－4には方形係数ベースで造波抵抗係数、粘性抵抗係数、馬力係数を例示します。下段図は実験結果、上段図はレベル2の回帰式の推定残差です。図－5、図－6は、同じデータを用いて、馬力係数を造波抵抗係数や粘性抵抗係数をベースに示した図です。

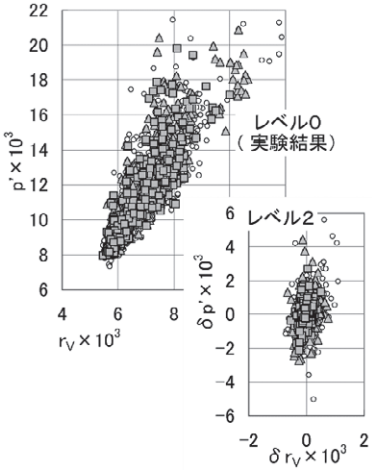
表－2や図－5によると、造波抵抗係数と馬力係数との間には大きな相関があります。この相関はレベル2の回帰式推定残差でもあまり小さくなりません。これは、レベルが3以上の船型要素の影響で造波抵抗係数が大きくなっている船型では、その影響で馬力係数も大きくなっていることを示しています。他方、図－6に示す粘性抵抗係数の場合は、粘性抵抗係数が大きい船型では馬力係数も大きいのですが、その多くはレベルが2以下の船型要素に起因していることが分かります。



図－4　実験結果およびレベル2の回帰式推定残差



図－5　造波抵抗係数と馬力係数

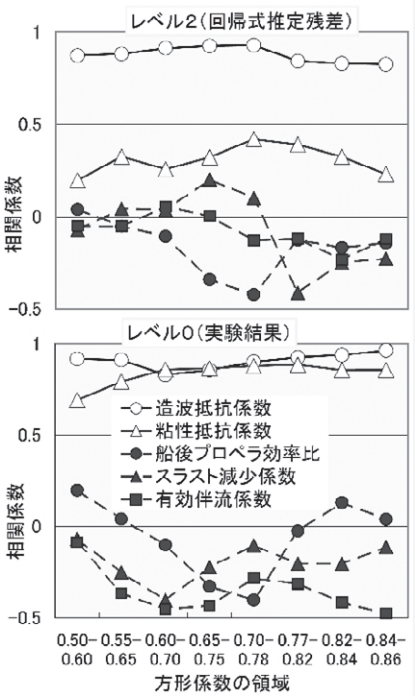


図－6　粘性抵抗係数と馬力係数

図－7は、図－4に例示した方形係数ベースのデータから、幾つかの領域毎に移動平均の手法で求めた相関係数です。各方形係数領域でみても、造波抵抗係数や粘性抵抗係数は、馬力係数との相関が大きいことが分かります。有効伴流係数との相関係数がマイナスになっています。他の性能要素が不変のとき、有効伴流係数は馬力係数と正の相関を有するはずですが、有効伴流係数が大きい船型では、粘性抵抗係数が小さく、スラスト減少係数が大きくなることが多く、また、プロペラ単独効率も大きくなりますので、結果として負の相関になっています。

次回は、相関の（その2）として、馬力係数に対する性能要素の寄与率、満載状態の推進性能とそれ以外の載貨状態の推進性能との相関について紹介する予定です。

（技術顧問　佐藤和範）



図－7　馬力係数との相関係数

SRC資料室(9)

推進性能と相関(その2)

前号では、

1. 船型要素のレベルとの相関
2. 性能要素間の相関
3. 馬力係数との相関

について紹介しましたが、本号はその続きです。

4. 馬力係数に対する寄与

推進性能は馬力係数の大小によって評価されます。前号では、性能要素と馬力係数との相関係数を紹介しましたが、ここでは、見方を変えて、「馬力係数を構成する個々の基本的性能要素(造波抵抗係数、形状影響係数または粘性抵抗係数、船後プロペラ効率比、スラスト減少係数、有効伴流係数)が馬力係数にどの程度の寄与をしているか」についてのデータを紹介します。

図-8は各性能要素の馬力係数との共分散を積み重ねた図です。馬力係数の表式に従い、船後プロペラ効率比とスラスト減少係数の場合は符号を変えた上で積み重ねています。また、プロペラ単独効率は、基本的性能要素によってほぼ決まる従属的性能なので、プロペラ単独効率からの寄与は、造波抵抗係数等の個々の性能要素の寄与に含めています。

図-8で、レベル0(下段図)とは、実験結果の平均値を推定値とした場合の残差の共分散です。レベル2(上段図)とはレベル2(前号の表-1参照)の船型要素による回帰式の推定残差の共分散です。各共分散を馬力係数の分散で割っていますので、残差が小さくその高次成分が無視できる場合は、各縦棒の(最大値+最小値)は1.0となります。よって1.0との違いが残差の大きさを表します。

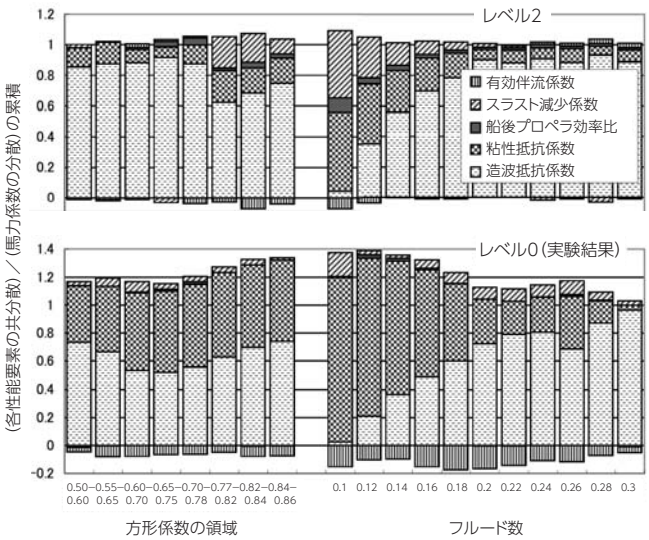


図-8　各性能要素の馬力係数に対する寄与

左側の図は、計画満載状態の方形係数によって領域に分け、その各領域で共分散を求めた場合の図です。各載貨状態の計画フルード数における推進性能を用いました。右側の図は各フルード数で求めた共分散の積み上げです。この場合は、計画フルード数に限定せず、水槽試験を実施した全てのデータを使用して計算しました。

左下の図を見ますと、馬力係数に対する寄与は、粘性抵抗係数の寄与に比べて造波抵抗係数の寄与が少し大きいようですが、その計である抵抗係数からの寄与が圧倒的です。船後プロペラ効率比の寄与は僅かです。有効伴流係数の寄与がマイナスになっていますが、これは、前号の図-7でも示しましたように、馬力係数の表式からは有効伴流係数が小さいと馬力係数も小さくなりますが、粘性抵抗増加やスラスト減少係数の減少を伴うことが多く、馬力係数が大きくなってしまうことの方が多くなることに因ります。

左上の図を見ますと、粘性抵抗係数の寄与が減少しています。これは、粘性抵抗係数の大小は、レベルが2以下の船型要素によってほぼ決まり、レベル3以上の船型要素の寄与が小さいことを示しています。船後プロペラ効率比の寄与が少し増えています。方形係数が大きい船型ではスラスト減少係数の寄与も増えています。

右側の図を見ますと、低フルード数では、造波抵抗の寄与が小さく、その分を粘性抵抗が寄与しています。これは、低フルード数では造波抵抗そのものが小さいので当然のことです。低フルード数ではスラスト減少係数の寄与も大きくなっています。有効伴流係数の寄与は、レベル0では全フルード数でマイナスとなっています。レベル2ではほとんど0で、これは、「レベル3以上の船型要素の違いにより有効伴流係数が変化しても、それに伴う粘性抵抗係数、スラスト減少係数等の変化により打ち消され、馬力係数はほとんど変化しない」ということを示しています。

図-8は日本造船技術センターが実施してきた水槽試験結果から作成しましたので、その対象となった船型に左右されます。また、寄与が小さい性能要素を軽視して良いということではなく、船型設計関係者は全ての性能要素を少しでも良くするために四苦八苦している、というのが最近の状況です。

5. 載貨状態と推進性能

計画満載状態で優れた性能を有する船型は、バラスト状態等の他の載貨状態でも優れているのでしょうか?

図-9は、計画満載状態の馬力係数をベースに計画満載状態に対する排水量比が0.45～0.55、0.70～0.80の載貨状態の馬力係数を示した図です。この場合も、レベル0（実験結果そのもの）とレベル2の残差を示してあります。図中には相関係数も示してありますが、レベル0ではかなりの相関があります。これは、主寸法的に計画満載状態の馬力係数が大きい船型では、その他の載貨状態の馬力係数も大きいのですから当然です。レベル2の残差は、主寸法、排水量比、トリム、プロペラ直径を考慮した回帰式による推定値の残差ですから、レベル3以上の船型要素（浮心前後位置、CP&CWカーブ、フレームライン等）の影響を示しますが、相関係数が小さくなっています。

相関係数が1.0の場合は、他の載貨状態の性能は計画満載状態の性能と同じように変わり、計画満載状態の性能向上を図ると、バラスト状態等の性能も自動的に良くなります。相関係数が−1.0の場合は、計画満載状態の性能向上を図ると、バラスト状態等の性能が悪くなり、船種によっては無駄な努力となります。

相関係数が0の場合は、計画満載状態の推進性能と他の載貨状態の性能は無関係であり、計画満載状態の性能向上を図ってもバラスト状態の性能も良くなるとは限りません。言い換えると、両載貨状態で優れた船型を開発し得ることになります。

図-9に示した相関係数を他の載貨状態の領域でも同様の方法で求めた結果を図-10に示します。多少の凹凸はありますが、排水量比が1.0から離れるに伴い相関係数が小さくなっています。載貨状態が満載状態から遠くなるに伴い少しずつ関係が薄れる、ということです。排水量比が0.4～0.5付近（タンカー等のバラスト状態に対応）の相関係数はレベル0の場合で約0.7、レベル2の場合で0.3程度です。

馬力係数は基本的性能要素の組み合わせで得られますので、それを構成する性能要素の相関係数が排水量比によってどのように変化するかを示したのが図-11です。左側の図はレベル0の場合の相関係数、右側の図はレベル2の場合の相関係数です。造波抵抗係数や形状影響係数の相関係数が小さく、自航要素の相関係数が大きくなっています。特に、レベル2の場合の造波抵抗係数の相関係数は排水量比が0.4～0.5付近で0.2程度となっています。自航要素の相関係数は0.6～0.8の程度です。馬力係数の相関係数はこれら各性能要素の相関係数の平均的値となっています。つまり、「計画満載状態の造波抵抗係数とバラスト状態の造波抵抗係数との相関係数（0.2）は小さいが、自航要素では相関係数（0.6～0.8）が比較的大きいので、馬力係数の相関係数は0.3程度となる」といえます。

0.3という相関係数は満載状態でもバラスト状態でも優れた船型を開発することが出来ることを示しています。

（技術顧問　佐藤和範）

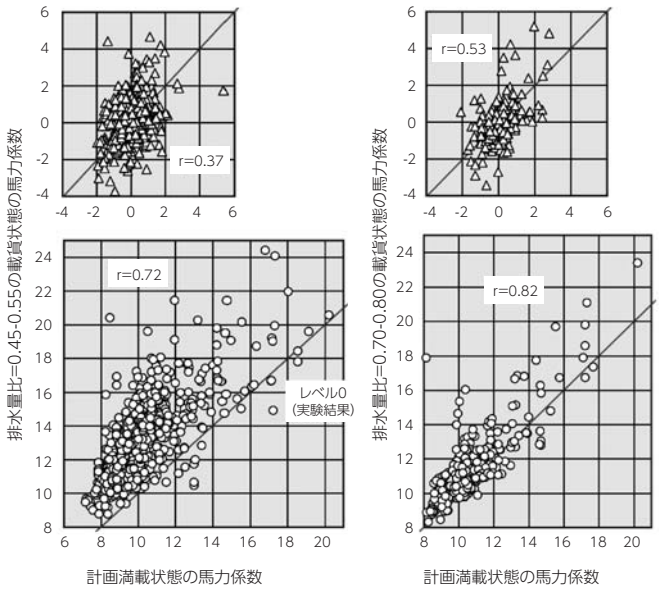


図-9　計画満載状態の馬力係数と軽い載貨状態の馬力係数（p' ×10³）

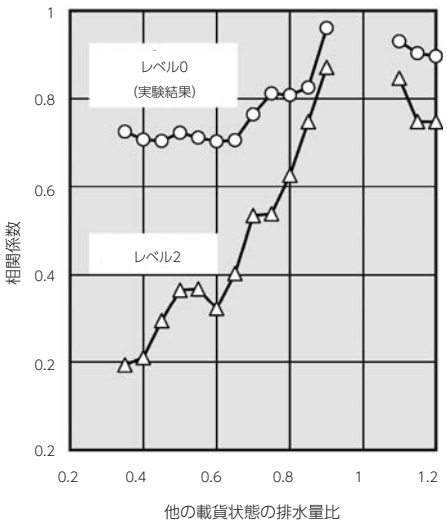


図-10　計画満載状態の馬力係数と
その他の載貨状態の馬力係数との相関係数

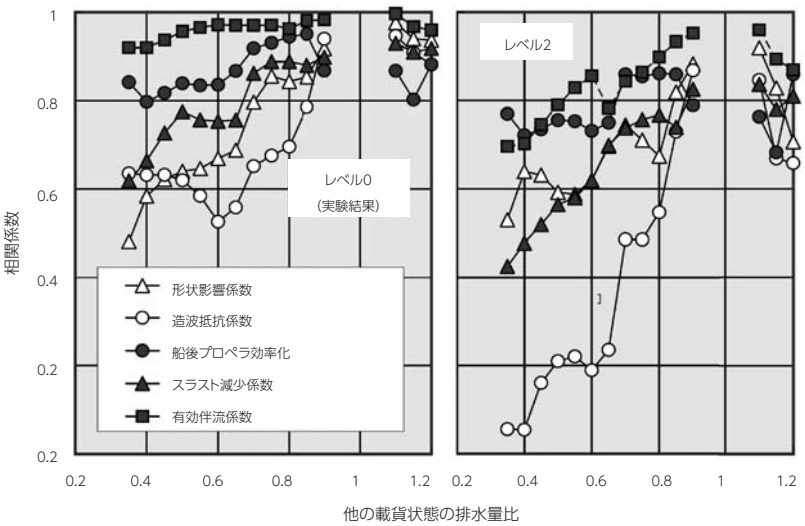


図-11　各性能要素の相関係数

Column 船の大きさ、速度と所要馬力

船の長さ幅比、幅喫水比、方形係数を同一にして相似形状を保ちつつ、船の大きさを変えた場合の抵抗係数、馬力等の例を付図に示します。船の排水量が100トンから1,000,000トンまで10倍毎に示しました。方形係数が0.80の比較的肥えた船型としました。同じタンカーでも内航の比較的小さいタンカーでは0.80より小さい方形係数、大型船型では0.80より大きい方形係数が採用されますが、ここでは平均的な値としました。

付図の(1)～(3)は、フルード数、レイノルズ数、速力をベースとした全抵抗係数CTです。(3)～(7)は速力ベースの抵抗係数、抵抗、有効馬力、伝達馬力、エネルギー効率です。エネルギー効率はトン・マイル当りの所要エネルギーを表す無次元係数です。この数値が大きい船型はエネルギー効率の悪い船型です。図中の○印等は速力が12ノットに対応する点です。

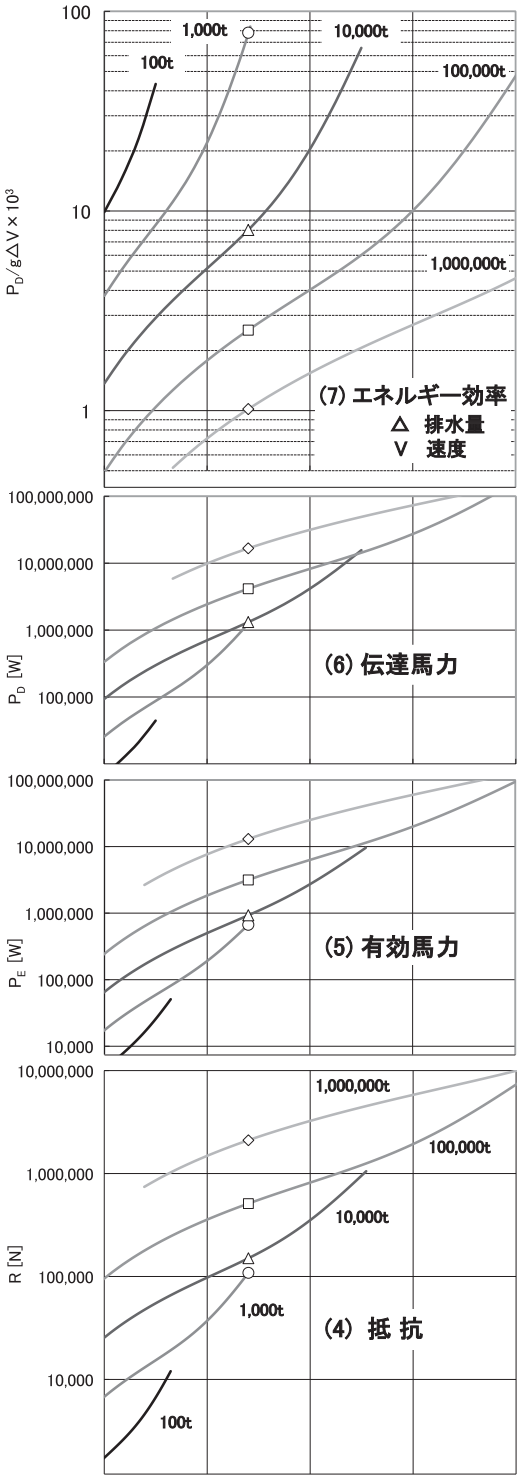
(1)に示すように、この船型では、フルード数が増加して0.2を越えるようになると抵抗係数が急増します。これは、造波抵抗の急増に起因します。排水量1千トンの船型では、12ノットに対応するフルード数が0.27程度になり、全抵抗係数は1万トン以上の船型に比べて、4倍程度となっています。造波抵抗からみると、12ノットという速力は、1万トン以上の船型では低速域ですが、1千トンの船型では高速域です。そのため、付図の(4)～(6)に示すように、12ノットの場合、1千トンの船型の抵抗や所要馬力は1万トンの船型と同程度になってしまいます。また(7)に示したエネルギー効率では、1万トンの船型の10倍程度になっています。

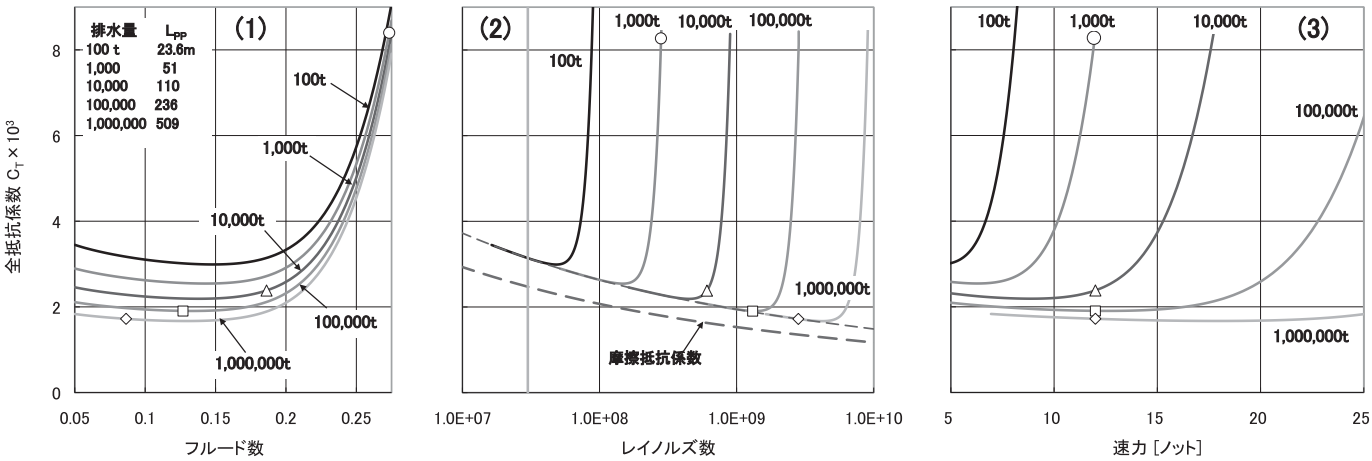
1千トンの船型の速力を11ノットに下げると所要馬力は半減します。また、方形係数を小さくして排水量を900トンにする場合も所要馬力は半減しますが、この場合は、載貨重量が15%程度減少してしまいます。

ここで示した数万トンの船型では15ノット程度で運行されますが、それは造波抵抗が小さい速度域ですので、船の排水量を100倍にするとエネルギー効率は1/10程度となります。

また、同一の船型では、速力が大きくなるに伴い、抵抗、所要馬力が大きくなります。排水量10万トンの船型を例にとると、10ノットのエネルギー効率は1.8、15ノットでは4.0、20ノットでは10.0で、5ノット毎に2倍強で増加しています。

よく言われるように、エネルギー効率の面からは、大きな船をゆっくり航走させるのが良い、ということになります。





(Lpp／B=6.0　B／d=3.0　CB=0.80　抵抗係数では⊿CF=0)