

プロペラ設計における最適直径と最適回転数 (その1, ピッチ比シリーズからの設計チャート)

船舶の設計においてプロペラ直径・回転数の決定は重要なテーマの一つとなっています。第一次のオイルショックを契機に、1970年代後半、減速ギアの進歩もあり、造船分野で低回転大直径プロペラがブームになりました。その後、船用機関の低速化も進み、現在、低回転大直径プロペラが常態となっています。

最近、必要な条件を入力するとプロペラ設計の結果が出力されるプログラムが普及していますので、最適プロペラについて考える機会も少なくなっていますが、プロペラ設計における最適直径、回転数の基本を充分理解しておくことも重要です。

プロペラ回転数の低速化は主機関の効率とも密接に関連する問題ですが、本稿ではプロペラ側、船体側のみからプロペラ直径、回転数について説明します。

1. BPチャート

図-1はプロペラ設計でよく使用されるBPチャートです。横軸を馬力係数 B_p の平方根、縦軸をピッチ比 p として、プロペラ単独効率(実線)と直径係数 δ (点線)の等高線が描かれています。

プロペラ前進速度 V_A 、主機関から伝達される馬力 P とプロペラ回転数 N を設計条件として与えますと、 B_p が定まります。横軸の B_p の値が定まると、プロペラ単独効率の等高線が右に凸となっている点でプロペラ効率が最高となります。この点を結んだ線(破線)が、 B_p が与えられたときの最高効率を表す線となります。

与えられた横軸の値と破線との交点における直径係数の値からプロペラ直径が、縦軸の値からピッチ比が定まります。これが、プロペラ前進速度、伝達馬力、

プロペラ回転数を設計条件として与えた場合の最適直径およびピッチ比です。

ピッチ比のみを数種変えたプロペラの単独性能から、図-1のようなチャートを1枚作成することができます。幾つかの翼数、展開面積比に対してチャートが用意されており、我が国ではMAUの設計チャートが有名です。

2. ピッチ比シリーズから得られる設計チャート

BPチャートはプロペラ前進速度、伝達馬力、プロペラ回転数を設計条件として与えて最適効率のプロペラ、即ち、プロペラが出力するスラスト馬力を最大にするプロペラ直径とピッチ比を求めるチャートです。

これ以外に、プロペラが出力すべきスラスト馬力を与えて、それに必要な伝達馬力を最小にする設計も考えられます。また、プロペラ回転数を与えて効率が最高となるプロペラ直径を求める設計とは逆に、プロペラ直径を与えて効率が最高となるプロペラ回転数を求める設計も考えられます。

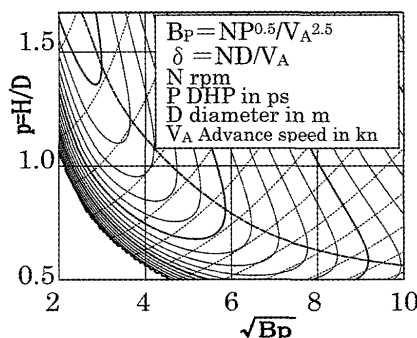


図-1 BPチャート

これらを示したのが図-3と表です。図-3は、図-2に示したピッチ比シリーズのプロペラ単独特性を使用して作成しました。横軸はSI単位を使用した無次元の荷重係数にしてあります。等高線も直径係数の代わりにプロペラ前進係数 J で表しています。

図-3の上の2個の図は、スラスト馬力(出力)を与えて伝達馬力(入力)を最小にする場合のチャートです。下の図は、逆に、伝達馬力を与えてスラスト馬力を最大にする場合のチャートです。

右側の2個の図はプロペラ回転数を与えて最適直径を求めるチャートです。下の図は図-1に示したBPチャートに対応します。スラスト馬力を与える上の図に対応するチャートは、従来BUチャー

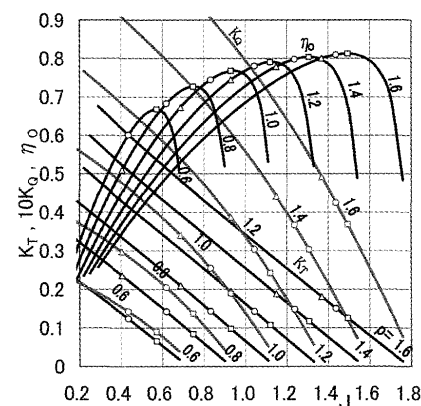


図-2 ピッチシリーズのプロペラ単独特性 これは、4翼、展開面積比 $a_e=0.47$ 、ボス比 $=0.17$ のプロペラの特性である。本稿では、プロペラ単独特性は揚力面理論による計算で求めた。粘性影響は相当二次元翼に対する二次元境界層計算で求めた。実船のレイノルズ数を想定し、前縁付近で乱流に遷移するものとし、表面粗度を $k_s=30\mu m$ として計算した。

		プロペラ設計 (1) V_A を与える。(2) (TV_A) ないし $(2\pi nQ)$ を与える。(3) D, n, p を選択。		
		(3) n, D, p の選択	最適プロペラ的设计 一つを与え、最適の条件(η_0 の最大化)から他の二つを決める。自由度は2	
		(2) (TV_A) ないし $(2\pi nQ)$ を与える	D を与えて η_0 =最大となる n, p を求める	n を与えて η_0 =最大となる D, p を求める
スラスト	スラスト係数 $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$	出力 (TV_A) を与えて入力 $(2\pi nQ)$ を最小化 $JK_T = \frac{(TV_A)}{\rho n^3 D^5}$	$(\pi C_p/8, K_{TD})$ $\frac{K_T}{J^2} = \frac{JK_T}{J^3} = \frac{(TV_A)}{\rho V_A^3 D^2}$ ベー	(K_{TN}) B_L チャート $\frac{K_T}{J^4} = \frac{JK_T}{J^5} = \frac{(TV_A)}{\rho V_A^5/n^2}$ ス
トルク	トルク係数 $K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$	入力 $(2\pi nQ)$ を与えて出力 (TV_A) を最大化 $2\pi K_Q = \frac{(2\pi nQ)}{\rho n^3 D^5}$	$(\pi C_p/8, 2\pi K_{QD})$ $\frac{2\pi K_Q}{J^3} = \frac{(2\pi nQ)}{\rho V_A^3 D^2}$ ベー	$(2\pi K_{QN})$ B_p チャート $\frac{2\pi K_Q}{J^5} = \frac{(2\pi nQ)}{\rho V_A^5/n^2}$ ス
プロペラ効率	$\eta_0 = \frac{TV_A}{2\pi nQ}$	$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q}$	$\eta_0 = \frac{出力}{(入力)}$ $\eta_0 = \frac{K_T/J^2}{2\pi K_Q/J^3} = \frac{JK_T/J^3}{2\pi K_Q/J^3}$	$\eta_0 = \frac{K_T/J^4}{2\pi K_Q/J^5} = \frac{JK_T/J^5}{2\pi K_Q/J^5}$

トと呼ばれていましたが、我が国では作成されませんでした。

左側の2個の図はプロペラ直径を与えて最適回転数を求めるチャートで、このタイプのチャートは従来作られなかったようです。これは、プロペラ回転数は設計条件として与えられるもので、自由には変えられない、という状況にあるからです。

図-3中の○印、破線はプロペラ回転数から K_T/J^2 または $2\pi K_Q/J^3$ を与えて最適直径を求める場合の最適曲線です。他方、△印、一点鎖線は、プロペラ直径から K_T/J^2 または $2\pi K_Q/J^3$ を与えて最適回転数を求める場合の最適曲線です。同じ○印、△印は図-2にも、小さい印ですが、示してあります。

また、□印は、図-2に示すようにピッチ比を変えた各プロペラの単独効率最高点です。図-3では、単独効率の等高線の下に凸な頂点となります。これは、設計条件として馬力が与えられずにピッチ比が与えられ、効率が最高になるプロペラ前進係数を求める設計に対応していますが、このような設計は普通、存在しません。

プロペラ回転数を与えて最適直径を求める場合の最適曲線（図-3の破線）とプロペラ直径を与えて最適回転数を求める場合の最適曲線（図-3の一点鎖線）とは一致しません。すなわち、プロペラ回転数を与えて最適直径を求め、この直径を設計条件として最適回転数を求めても、最初に設定した回転数とはなりません。このことを形式を変えて示したのが図-4です。

これは K_T/J^2 等、4個の荷重係数を横軸、縦軸にしてプロペラ単独効率（実線）とピッチ比（点線）を等高線で示した図です。左の図は伝達馬力が与えられた場合の図、右側はスラスト馬力があたえられた場合の図です。横軸はプロペラ直径を表し、縦軸はプロペラ回転数を表します。馬力とプロペラ前進速度に加えて、プロペラ直径を与えると横軸の値が定まり、プロペラ単独効率はプロペラ単独効率の等高線の左に凸になっている点で最高になりますので、図中の一点鎖線がプロペラ直径を与えた場合の最適回転数を与える曲線です。同様に、破線がプロペラ回転数を与えた場合の最適直径を表す曲線です。確かに、二つの最適曲線は一致していません。

○印、破線と△印、一点鎖線、さらに□は図-2〜3と同じものです。図-1、3〜4はすべて図-2に示したデータか

ら作成しました。図-1等から図-2を作成することもできますから、本稿で示した8枚の図は同じ情報を含んでおり相互に変換可能です。

また、図-4では左上から右下に向かう領域でのみ等高線を示しています。これ以外の領域はプロペラ効率が悪く使用されることはありません。低回転大直径プロペラの低回転化（下向）と大直径化

（右向）は一体のもので、片方だけではプロペラになりません。

以上は、ピッチ比のみを変えたプロペラ特性から得られる結論です。

実際にはプロペラ直径や回転数を変えると推進性能、キャビテーション性能、強度条件も変わります。次回はこれらも考慮したより実際的な例を示します。

（技監、佐藤和範）

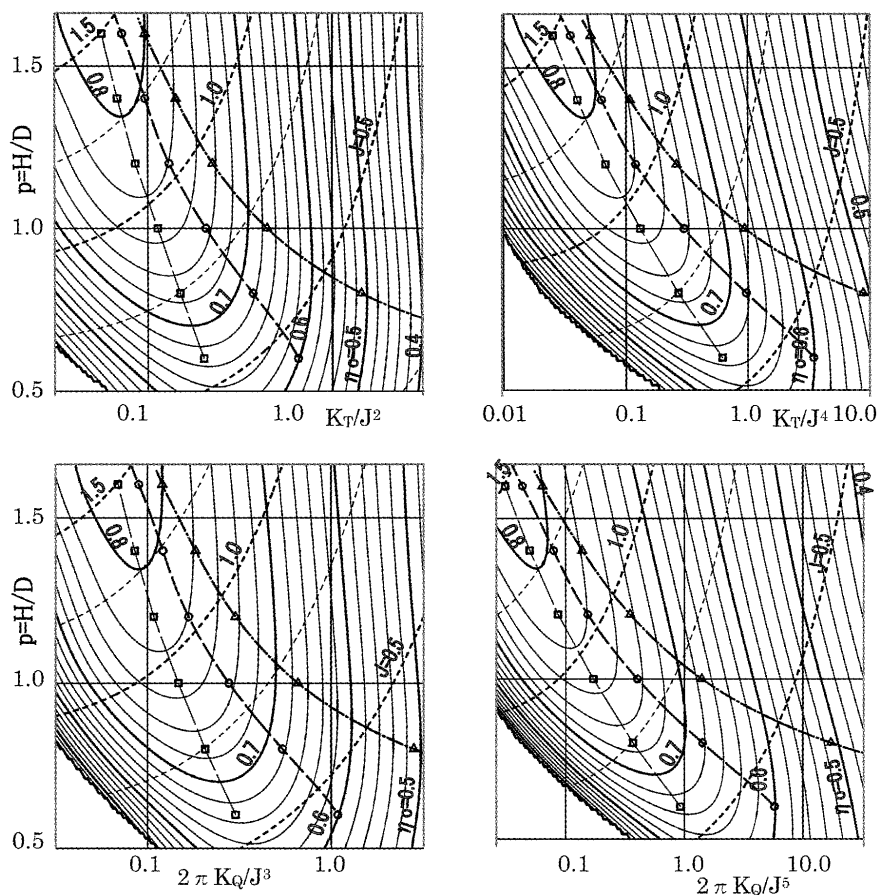


図-3 荷重係数を変えたプロペラ設計チャート

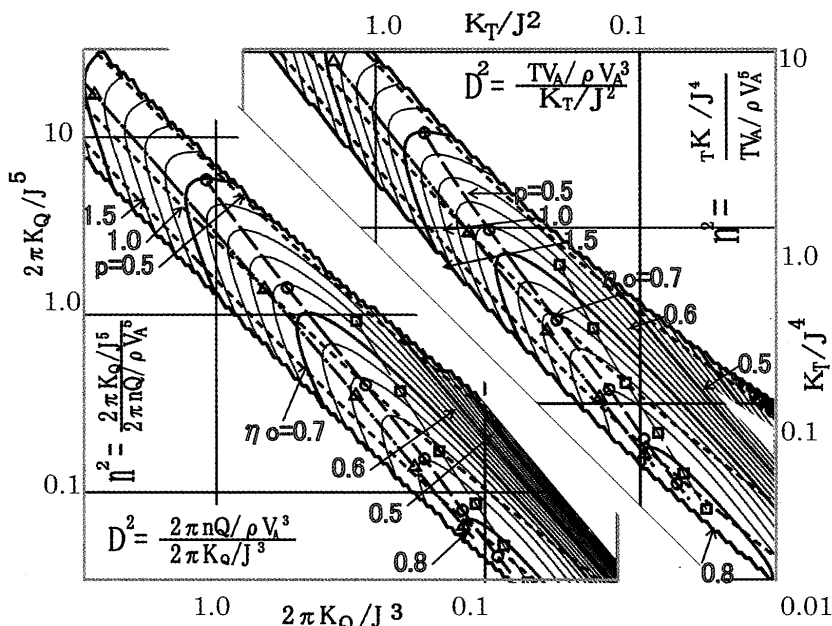


図-4 4個の荷重係数とプロペラ効率等