

船体副部の抵抗について

1軸船はビルジキールと舵を装備する程度ですが、2軸船ではプロペラ軸系を支えるシャフトブラケットやポッシング、更に、横揺れ減衰のためのフィンが装備される場合があります。最近では推進用モーター内臓ポッドと支えのストラットが装備される例もあり、これら副部と呼ばれる突起物の大きな抵抗により推進性能が低下します。その他、サイドスラスタや減揺フィンを取りめるトンネルや空所、海水の取排水孔などの開口も条件次第では抵抗が増すこともあります。溶接ビードや電食防止用のピース等の小さな突起物や就航後付着する海生物も個々の部分は小さく抵抗も無視できるレベルですが、多数累積した抵抗は無視できないオーダとなります。図-1に、典型的な副部の形態を紹介します。

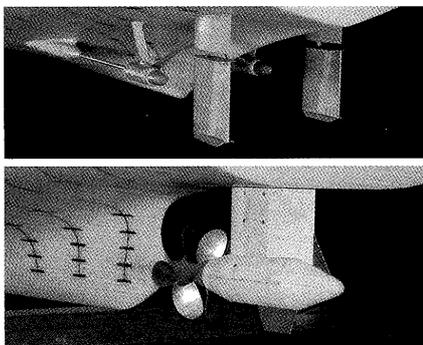


図-1 副部の例

1. 流体力学的考察

1.1 境界層内の速度分布

副部は装備される船体表面に沿う流れの中で渦を作り抵抗を生じます。船体表面に沿う流れは壁乱流で、壁面（船体表面）に沿って運動量を失った部分が流体中に広がって境界層を作ります。境界層（内層）は壁に極近く粘性の影響を強く受ける粘性底層と壁から離れ乱流影響が支配的な慣性底層及び中間の緩和層からなっています。境界層の外側（外層）は非粘性流れとみなされます。2次元平行流の壁近くの運動方程式は

$$\nu \frac{dU}{dy} - (u'v') = (L-y) \frac{d(P/\rho)}{dx}$$

$$\nu \frac{dU}{dx} = L \frac{d(P/\rho)}{dx} = \tau_w / \rho = u \tau \wedge 2$$

ここで、 ν は動粘性係数、 τ は壁面での摩擦応力、 $-u'v'$ はレイノルズ応力、 dU/dy は速度勾配、 P は圧力、 $2L$ は平行壁間の距離、 $u \tau$ は摩擦速度です。壁近くでは摩擦速度と分子拡散による距離($\nu/u \tau$)から、慣性底層では混合距離は壁からの距離に比例するとし、 $l = \kappa y$ から、速度分布が求められます。 κ はカルマン定数で、 $1/\kappa = 2.5$ です。

粘性底層 $U(y)/u \tau = u \tau y / \nu$

慣性底層 $U(y)/u \tau = (1/\kappa) \ln(u \tau / \nu) + B$

式中の B は壁面の粗さ k により決まる定数で、 $Rk = ku \tau / \nu < 5$ では一定で、壁は滑面とみなされますが、 $Rk > 55 \sim 70$ では粗さが粘性底層の外に出て乱れを発生するため、粗さ k を代表長さとする以下の式となります。

$$U(y)/u \tau = (1/\kappa) \ln(y/k) + Bk$$

なお、完全粗面では $Bk = 8.5$ となります。図-2に境界層内の速度分布を、図-3に粗さ k と円管の摩擦抵抗係数との関係を示します。なお、慣性底層の速度分布は、一般に境界層外縁での流速を U_0 とする $1/7$ 乗則 ($U(y)/\delta) = U_0 / \delta)^{1/7}$ で表されます。

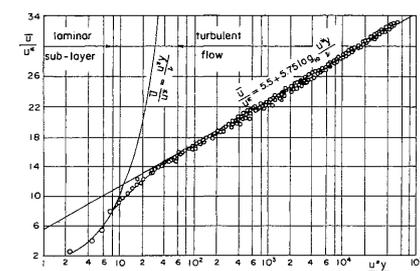


図-2 境界層内の速度分布

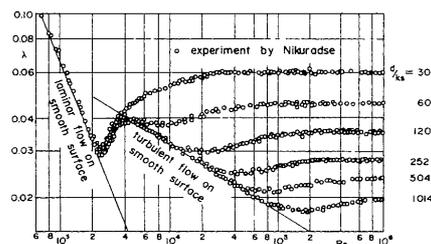


図-3 粗さ k と円管の摩擦抵抗係数との関係

1.2 物体周りの流れと抵抗

流れの中に置かれた物体の受ける抵抗は流体の粘性により生じ、流れはレイノルズ数(VL/ν)の増加に伴い、層流から乱流に変化し、対応して流れの様相と抗力係数が変化します(図-4)。副部は境

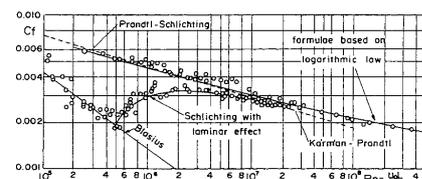


図-4 レイノルズ数と摩擦抵抗係数との関係

界層内外の流れの中で、レイノルズ数の影響の下に渦を作り抵抗を生じます。なお、実船寸法の副部はレイノルズ数が概ね 10^7 程度で完全に乱流状態にありますが、模型船寸法では 10^5 程度の層流と乱流が共存する範囲にあるため、水槽試験結果の評価には注意を要します。色々な形態の物体や表面の凹部による抵抗係数を纏めた資料が公表されていますので参考にすることを薦めます。

2. 突起状副部の抵抗計算方法

抵抗の原因である渦には、突起物に根元の境界層中に生じる首飾り状の渦、端部からの剥離による渦がありますが、突起物表面の境界層剥離を含む粘性流れによる抵抗を主体として以下のような簡便な方法が用いられます。

外層の流速を U (m/s)、境界層厚さ δ 、副部は高さ、 H 幅 B の長方形正面投影面を持ち、先端から距離 X の場所にあるとします。内層の速度分布には $1/7$ 乗則を適用し、突起物の抗力係数 Cd を求めます(図-5)。境界層厚さは、以下の式より求めます。 $\delta = 0.37X / Rex^{1/5}$ 、ここで、 $Rex = UX / \nu$

境界層内におさまる場合の抵抗係数は

$$Cd = Rd / (1/2 \rho U^2 HB) = Cdo (7/9) (H/\delta)^{2/7}$$

境界層外に突き出る場合の抵抗係数は

$$Cd = Rd / (1/2 \rho U^2 HB) = Cdo (1 - 2\delta/9H)$$

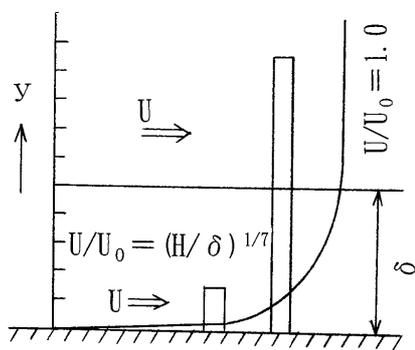


図-5 突起物に当る流速

となります。C_{d0}は一樣流中の抗力係数で、文献Fluid dynamic dragなどに記載の値を用いると便利です。参考に、L×B×d = 100m×17.5m×5m Vs = 20knotsの船体表面の突起の抗力係数が船首端からの距離により変化する傾向を求め、船首部の溶接ビードの抵抗や船尾部に取付けた板の抵抗の計算例を表-1、表-2に示します。ビードや板の高さは勿論ですが取付け場所の影響の大きいことが分かります。

3. 船体に装備された状態の副部抵抗

色々な副部を装備した模型船の試験から副部抵抗を評価する場合、個々の副部毎に抵抗試験を繰り返すことは時間と費用から一般的ではなく、形状や大きさの異なる副部を纏めて評価せねばなりません。そこで、副部の容積、浸水面積及び抵抗を全副部装備状態と裸殻状態の値の差として、以下のように副部抵抗係数とレイノルズ数の関係を求めます。

F: 副部浸水面積=S_a-S_n

ΔR=R_a-R_n

S_a, S_n副部装備及び裸殻状態浸水面積

R_a, R_n副部装備及び裸殻状態全抵抗

C_{app}=ΔR/(1/2 ρ Vm²F)

Re_{app}=Vm√F/2/ν

C_{app}: 副部の抵抗係数

Re_{app}: 副部のレイノルズ数

滑らかな平板の摩擦抵抗係数に対する副部抵抗係数の比が評価の指標となります。ここで、他資料との比較の便宜より

溶接ビード高さ (H)

対象船L×B×d=100m×17.5m×5m C_b=0.55
性能Vs=20knot, Ra=35,700kg, EHP=4,900ps

X(m)	1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
δ (m)	0.015	0.055	0.096	0.166	0.230	0.290	0.347	0.401	0.454	0.505	0.555	0.604
H=1mm												
C _d /C _{d0}	0.359	0.247	0.211	0.181	0.164	0.154	0.146	0.140	0.135	0.131	0.128	0.125
R (kg)	21	18	19	21	22	23	22	21	18	13	12	7
											合計	217kg
												0.6%
(C _{d0} =1.0)												
H=5mm												
C _d /C _{d0}	0.568	0.393	0.334	0.286	0.260	0.244	0.232	0.222	0.215	0.208	0.203	0.198
R (kg)	168	146	151	168	178	181	176	165	147	122	90	55
											合計	1747kg
												4.9%
(C _{d0} =1.0)												
ビード長(m)	10.7	13.3	16.3	21.2	24.7	26.8	27.5	26.8	24.7	21.2	16.3	10.0

表-1 突起物影響評価例

板幅1,000mm、速力20knot、C_x=1.0

H (mm)	500	300	200	100	50
C _d /C _{d0}	0.776	0.700	0.596	0.490	0.402
R (kg)	2,147	1,162	659	271	111
	6.0%	3.3%	1.8%	0.8%	0.3%

表-2 S.S.No.2に設置の板の抵抗

プラントル・シュリヒティングの式を採用しますが、境界層からの突出しが大きいにも拘わらず以上の比率が滑らかな面に対応するζ=0.455を大きく下回る場合は、実験時の副部周り流れが層流或いは遷移状態にあった可能性など、試験の評価や実船推定に十分注意する必要があります。図-6に副部抵抗係数の例を示します。レイノルズ数域は遷移域から乱

流域に変わる範囲ですが、滑面平板の抵抗より多少大きな程度で全体として平板の摩擦抵抗に平行な傾向が見られますが、係数の大きな場合もあります。一方、レイノルズ数の低い範囲に非常に小さな抵抗係数の例が見られますが乱流状態に達することの出来無かったものと考えられます。

おわりに

2軸船やポッドプロペラ装備船にあっては副部の抵抗評価は推進性能上の重要な課題ですが、通常の1軸船にあっても、舵形状や溶接ビード対策等の問題があります。本稿が、副部に関連する流体现象の理解と定量的評価に役立てば幸いです。

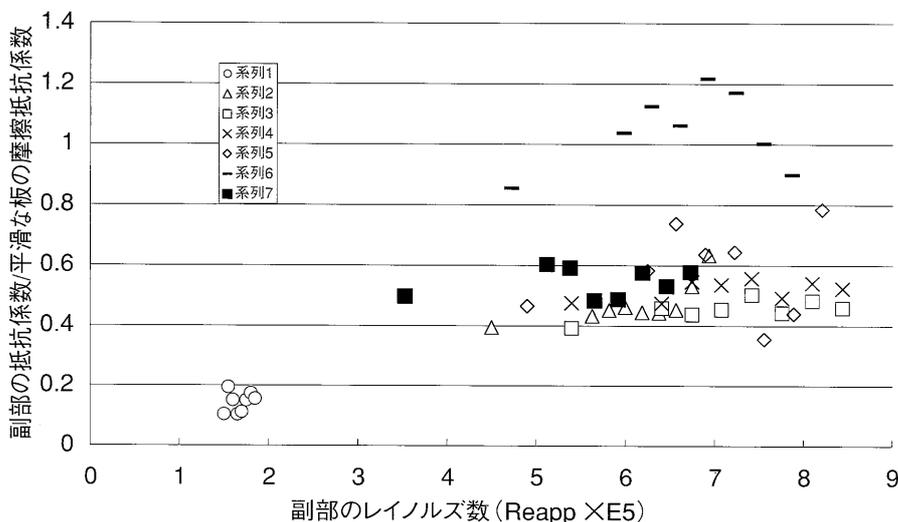


図-6 副部抵抗係数例