

# 防食用塗装皮膜の剥離強度および 塗装面の流体摩擦抵抗の研究

今井康文\*・石田正弘\*\*・楠本 韶\*\*

## Study on the Adhesive Strength and the Hydraulic Frictional Resistance of Anticorrosive Paint

by

Yasufumi IMAI\*, Masahiro ISHIDA\*\*  
and Sho KUSUMOTO\*\*

### Abstract

Splitting of paint film seems phenomenologically quite analogous to the crack propagation through the continuous body. The tip of splitting represents the boundary separating the continuous body from the broken. The fracture mechanics, therefore, could be applied for the assessment of adhesion of paints in the same line as of adhesive joints in structures. In this paper, a theory has been developed to estimate the adhesive energy of paints. Isophthalic resin coating was splitted from the substrate by wedging and peeled lengths were measured as a function of the wedge thickness. Employing the theory, adhesive energy was estimated to be 50-100 J/m<sup>2</sup>, which is quite resemble to the adhesive energy of epoxy resin to aluminum alloy substrates.

Additionally, the effect of painting on the reduction of hydraulic frictional resistance has been studied quantitatively using three cylinders with different surface roughness. When the relative surface roughness was decreased from  $2.5 \times 10^{-5}$  to  $0.6 \times 10^{-5}$  by painting and polishing, the frictional resistance was reduced by about 2% under the high Reynolds number condition. More effect of painting is expected for ships because the ship Reynolds number is higher than the present experiment.

### 1. 緒 言

船底や海洋構造物に腐食防止, 生物付着防止, 生物侵入防止などの目的で塗料を用いる場合, 塗膜自身の強度とともに, 塗膜と生地との付着性の良否も性能上重要なファクタとなる。しかし, 今日まで付着性の評価についてあまり重要視されず, 定量的な取り組みがなされていない。すなわち, JIS K5400 には, 塗料一般試験方法が規定されていて<sup>(1)</sup>, 6. 13耐衝撃性, 6. 14鉛筆引っかき試験, 6. 15基盤目試験に, 定性的な付着性良否推定法が定められているのみである。たとえば, 基盤目試験では, カッターナイフを用い塗膜に基盤目状の切り傷をつけ, 塗面に現われた傷の状態か

ら評価点数を定めるというものであるが, 他の試験による結果との比較もできず, 信頼性に欠ける。

塗膜が剥げるという現象のみに注目してみると, 剥がれの先端はちょうど連続体中にあるき裂の先端と同じ状態にあり, 連続部と破断部との境界になっている。すなわち, この部分は, き裂の力学により解析が可能と考えられる。そこで, 本論文では, 塗膜の剥がれに破壊力学の考えを適用し, 付着力の定量的評価を試みる。破壊力学はすでに, 接着剤の接着力評価には広く応用されている<sup>(2)</sup>が, 塗膜の付着も本質的には接着剤による固体間の接着と同じ現象であり, 違いはただ, 塗膜の場合, 膜の一面が自由表面になっているという

昭和63年9月30日受理

\*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

\*\*機械工学第二学科 (Department of Mechanical Engineering II)

ことだけである。

さて、JIS<sup>(9)</sup>には規定はないが、接着剤の接着性評価の試験方法として、Fig. 1 (a)に示すように、生地に穴をあけ、接着背面から圧力を加え、円板状に接着層を剥すプリスタ試験がある。Williamsら<sup>(4)</sup>はこの方法によって塗膜の付着性を評価している。しかし、ここではもう少し簡単な評価方法を採用する。すなわち、ObreimoffがFig. 1 (b)のような方法により雲母片の剝離強度を研究した<sup>(9)</sup>が、これは塗膜の剥がれときわめてよく似た状況にあるので、今回は、これに習って実験し、解析を進める。

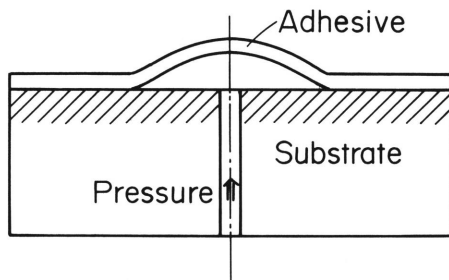
次に塗装面の流体抵抗特性については、たとえば船舶の燃料経済性などに関連した興味ある問題であり、経験的には塗装の種類によって燃料消費量が異なると言われているが、定量的な検証が少ない。このため、本研究では塗装による流体摩擦低減効果について、表面粗さの観点から定量的評価を加えている。

2. 実験方法および解析方法

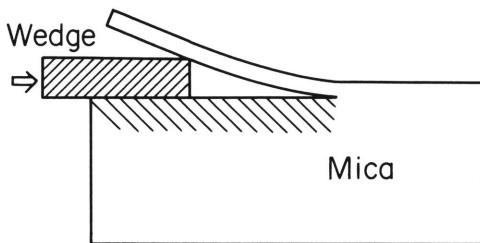
2. 1 剝離特性

(a) 実験方法

試験片は、JIS K5400 塗料一般試験方法 3. 5 試験片の作り方に準じ、300×300×0.6の鋼板に、イソフタル酸系塗料を吹き付け塗装して作った。所定の方法による乾燥後、5×30の薄片に切り出し、切断面を塗膜と生地との区別がつくよう良く研磨した。研磨面は観察



(a) Blister test.



(b) Obreimoff's experiment on mica.  
Fig. 1

に便利なように金蒸着を施した。その後、種々の厚さのくさび片を塗膜と生地鋼板との間に差入れ、Fig. 2のように塗膜を剝離させた。鋼片を進めると剝離部も進むが、剝離長さは差し込んだくさび片の厚さによりほぼ一定となる。くさび片と塗膜の剝離部を写真撮影し、写真上で塗膜の変形を計測し、後の解析に用いた。

(b) 解析方法

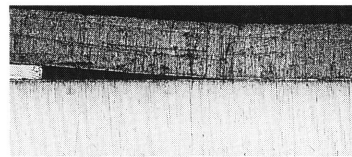
塗膜の応力歪関係を、一般的に、

$$\sigma = \pm E |\epsilon|^n \quad (+ : \text{引張り}, - : \text{圧縮}) \quad (1)$$

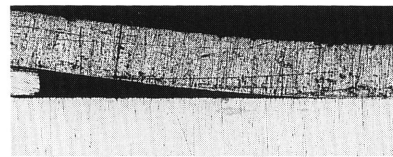
のように表す。n=1の場合は線形弾性体となり、Eは縦弾性係数となる。剝離した塗膜をFig. 3のように幅B、高さH、長さLの片持ち梁と考える。梁の微小部分が曲げモーメントMを受け、曲率1/ρの変形をするとすると、曲げモーメントと曲率の間に、

$$\frac{1}{\rho^n} = \frac{2+n}{2E} \left(\frac{2}{H}\right)^{n+2} \frac{M}{B}$$

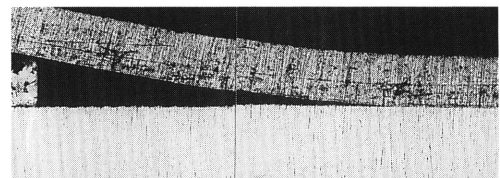
が成立する。



(a) Wedge thickness, 0.10 mm



(b) 0.19 mm



(c) 0.33 mm

Fig. 2 Splitting of paint film with a thin wedge.

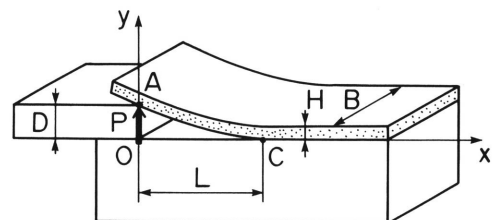


Fig. 3 Analyzing model for splitting paint film.

梁のたわみを  $y$  とすると、変形が微小な場合は、 $M = Px$  として、次式が得られる。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{2}{H} \left\{ \frac{2(2+n)}{EBH^2} \right\}^{1/n} P^{1/n} x^{1/n}$$

上式を解き、荷重点  $x=0$  での変位  $y=D$  で、荷重  $P$  を消去して、

$$\frac{y}{D} = 1 - \frac{1+2n}{1+n} \left( \frac{x}{L} \right) + \frac{n}{1+n} \left( \frac{x}{L} \right)^2 \left( \frac{x}{L} \right)^{1/n} \quad (2)$$

を得る。

この場合のコンプライアンス  $\lambda_n (= D^n/P)$  は

$$\lambda_n = \left( \frac{2n}{1+2n} \right)^n \frac{2(2+n)L^{1+2n}}{EBH^{2+n}}$$

であり、き裂が  $L \rightarrow L + \delta L$  と進展することに伴うエネルギー解放率  $G^{(6)}$  は、

$$G = \frac{1}{1+n} \frac{D^{1+n}}{\lambda_n^2 B} \frac{d\lambda_n}{dL} = \frac{1+2n}{2(2+n)(1+n)} \left( \frac{1+2n}{2n} \right)^n EH^{2+n} \left( \frac{D}{L^2} \right)^{1+n} \quad (3)$$

のように求まる。エネルギー解放率  $G$  が塗膜の付着エネルギーと等しい時、剥離すると考えられるので、塗膜の付着エネルギーを(3)式により評価することができる。また、 $n=1$  の線形弾性体の場合は、

$$\frac{y}{D} = 1 - \frac{1}{2} \frac{x}{L} + \frac{3}{2} \left( \frac{x}{L} \right)^3 \quad (2')$$

と、良く知られた結果となり、エネルギー解放率も、

$$G = \frac{3}{8} EH^3 \left( \frac{D}{L^2} \right)^2 \quad (3')$$

と、DCB 破壊靱性試験片の  $1/2$  になっている。

さて、(3)、(3)'式は付着エネルギーの表式と見ることができるが、応力歪関係の指数  $n$  によらず、塗膜の変形が  $D/L^2$  の組み合わせで式の中に取り込まれている。  $D$

の値は、くさび片の厚さで既知であるから、剥離長さ  $L$  を測定するのみで付着エネルギーの評価ができる。(3)式は、付着力が弱いと剥がれ易いという経験則を定量的に表現したことになる。

## 2. 2 塗装面の流体抵抗特性

塗装面の表面状態と流体摩擦の関係を調べるため Fig. 4 に示す試験装置を考案し製作した。外周面上に供試塗料を塗装した外径165mmの供試円筒  $E$  は、内径200mmの円筒水槽  $F$  の中において、駆動用モータ  $B$  によって回転される。 $E$  と  $F$  は同心二重円筒を構成し、円筒  $E$  の内部は中空密封で、 $E$  と  $F$  の間には常温の水を封入している。円筒  $E$  を回転させるための駆動トルクはモータ  $B$  のケーシングに作用する反動トルクを歪ゲージ式トルク検出器  $C$  にて検出する。また、モータの回転数は電磁ピックアップと歯車を用いた回転検出器  $A$  にて検出する。なお、水温変化に基づく水の粘度変化を考慮するため熱電対  $D$  により容器内水温を検出している。

3種の供試円筒諸元を Table 1 に示す。供試円筒の素材は塩化ビニール樹脂で、type A は円筒表面を機械加工により真円に仕上げたもの、type B は type A の表面に厚さ約0.1mmで供試塗料を塗布したもの、type C は type B の塗装面をさらに表面仕上げしたものである。円筒表面粗さの計測結果を Fig. 5 に示す。図において、A は B、C と縦尺度が異なり、それぞれの尺度スケールを図の右に示した。円筒表面平均粗さは type A、B および C においてそれぞれ、約4、2、1  $\mu\text{m}$  であった。Table 1 に示したように、表面粗さ  $\epsilon$  と円筒外径の比で表される相対粗さ  $\epsilon/d$  はそれぞれ  $2.5 \times 10^{-5}$ 、 $1.2 \times 10^{-5}$ 、 $0.6 \times 10^{-5}$  であり、いずれも極めて小さい値である。

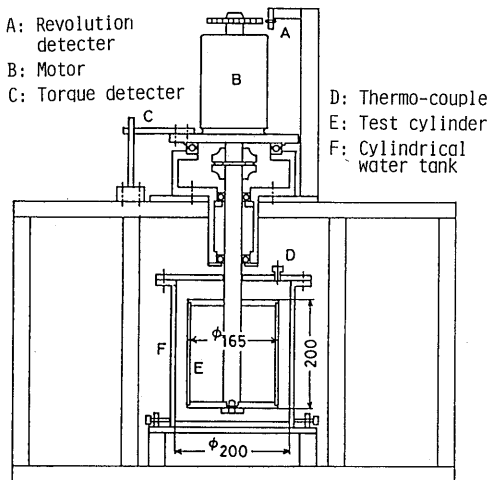


Fig. 4 Test facility for friction torque measurement.

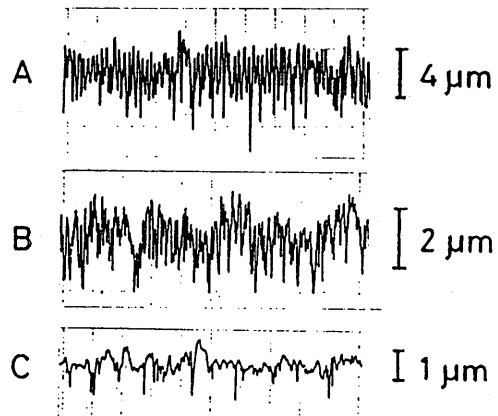


Fig. 5 Surface roughness of test cylinder.

Table 1 Principal particulars of test cylinder

type	Diameter d(mm)	Length l(mm)	Roughness $\epsilon$ ( $\mu\text{m}$ )	Relative Roughness ( $\epsilon/d$ )
A	164.53	199.60	4.1	$2.5 \times 10^{-5}$
B	164.68	199.85	2.0	$1.2 \times 10^{-5}$
C	164.61	199.70	1.0	$0.6 \times 10^{-5}$

### 3. 結果と考察

#### 3. 1 剝離特性

##### 3. 1. 1 結果

Fig. 2 に見るように、剝離開始点はほぼ見当がつく。しかし、ここでは正確を期すため、Fig. 6 に○印で示すように剝離部の塗膜の変位を測定し、それらが(2)式で最も良く近似できるように、最小自乗法により  $L$  を決定した。図中の実線は  $D=0.19\text{mm}$ ,  $n=1$ ,  $L=2.64\text{mm}$  として計算されたもので、良く実測点を近似している。

くさび片の厚さを変え、新たに塗膜を剝離させ、同様に剝離長さ  $L$  を求めた。それらをプロットすると Fig. 7 のようになる。図中の実線は  $D/L^2 = 0.0283 \text{ l/mm}$  の関係を示していて、同じ試験片では、くさび片厚

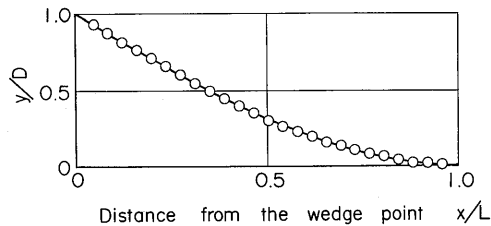


Fig. 6 Deflection of splitted film and the approximation by Eq. (2).

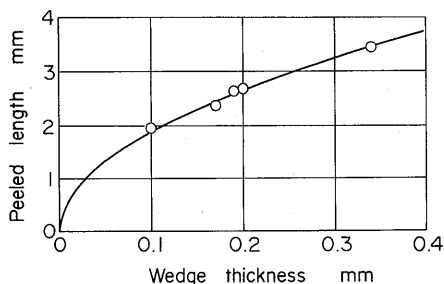


Fig. 7 Relation between the wedge thickness  $D$  and the splitted length  $L$ .

Table 2 Results of the splitting test

No	$D$ mm	$L$ mm	$L_e$ mm	$H$ mm	$R_{rms}$ $\mu\text{m}$	$G$ J/m <sup>2</sup>
1	0.10	1.53	1.38	0.34	0.42	75.6
	0.15	1.90	2.05			
	0.20	2.02	2.11			
2	0.10	1.58	1.49	0.34	0.41	91.0
	0.14	1.69	1.76			
	0.20	2.09	2.10			
	0.23	2.26	2.22			
	0.34	2.44	2.30			
3	0.10	1.43	1.37	0.32	0.39	110.6
	0.17	1.74	1.83			
	0.19	1.80	1.70			
	0.23	2.04	2.02			
	0.32	2.17	2.28			
4	0.10	1.72	1.85	0.36	0.40	101.2
	0.15	1.96	1.88			
	0.19	2.06	1.90			
	0.24	2.12	2.28			
	0.33	2.48	2.76			
5	0.10	1.83	2.11	0.34	0.39	52.9
	0.15	2.13	2.25			
	0.19	2.51	2.37			
	0.25	2.36	2.87			
	0.33	2.78	2.91			
6	0.10	1.45	1.49	0.34	0.36	99.3
	0.14	1.68	1.52			
	0.19	2.06	2.03			
	0.24	2.09	2.11			
	0.33	2.45	2.50			
9	0.10	1.58	1.53	0.36	0.27	80.5
	0.15	1.98	2.08			
	0.19	2.14	2.38			
	0.21	2.06	1.87			
	0.33	3.33	3.30			
10	0.10	1.96	2.12	0.43	0.19	59.7
	0.15	2.37	2.55			
	0.19	2.64	2.63			
	0.20	2.68	2.56			
	0.34	3.45	2.97			
11	0.10	2.02	2.15	0.44	0.23	63.5
	0.17	2.63	2.83			
	0.19	2.62	2.85			
	0.21	2.67	2.78			
	0.33	3.33	3.30			
13	0.10	1.94	1.89	0.50	0.18	88.6
	0.17	2.68	2.83			
	0.20	2.67	2.49			
	0.20	2.49	2.29			
	0.33	7.63	6.96			
21*	0.10	4.35	3.41	1.04	0.24	43.6
	0.16	4.43	4.80			
	0.19	4.82	4.42			
	0.20	4.59	4.61			
	0.33	7.63	6.96			
22*	0.10	2.81	2.99	0.84	0.22	55.3
	0.16	3.51	3.13			
	0.19	4.68	5.45			
23*	0.10	3.00	2.73	0.82	0.21	108.7
	0.16	3.27	3.41			
	0.18	3.42	3.42			
	0.20	3.66	3.46			

Le: Estimated length from the initial slope

\* Reinforced by coating epoxy resin

き  $D$  に応じて剥離長さ  $L$  は変化するが、 $D/L^2$  の値はほぼ一定となった。

実験で得られた  $D-L$  の値を Table 2 に示した。また、 $n = 1$ 、 $E = 2.6\text{GPa}$  として評価した付着エネルギーも併記した。エポキシ系接着剤とアルミ合金との界面の接着エネルギーは<sup>(7)</sup>、 $50\sim 80\text{J/m}^2$  と得られているが、これら接着剤の接着エネルギーに極めて近い値  $50\sim 100\text{J/m}^2$  が得られた。

また、表中には生地粗さ  $R_{rms}$  も示した。ばらつきは大きいですが、付着エネルギーは表面粗さが粗いと大きくなる傾向が見られる。

### 3. 1. 2 考 察

#### (a) 剥離長さの推定

上述のように、剥離膜の変形は(2)式で良く表される。このことは、その変形の傾き角  $dy/dx$  も解析と良く一致することを意味する。 $x=0$  での塗膜の傾き角  $(dy/dx)_0$  が(2)式より、

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_0 = -\frac{3}{2} \frac{D}{L}$$

となるので、くさび片と塗膜の接触部 (Fig. 3 の A 点) 付近の傾き角から  $L$  を推定できると期待される。塗膜の接触部から  $0.3\text{mm}$  までの範囲を直線近似して、その傾きから推定した  $L$  の値を、塗膜全体の変形から求めた値と比較したものを、Fig. 8 に示す。初期傾き角で剥離長さが良く推定されている。この方法によると、塗膜表面から、塗膜面の傾きの測定をすれば良く、塗膜の断面を観察する必要がないので、迅速な定量評価法として役立つと思われる。

#### (b) くさび片による接線力の影響

塗膜の変形を解析する際、塗膜に加わる力として押し上げ力のみを考えた。くさび片が薄く、塗膜の傾きが小さい場合、これでほぼよいと思われるが、ここで

は、くさび片による接線力の影響を検討する。

簡単のために、塗膜は線形弾性体とし、Fig. 3 で、A 点に  $x$  方向にも力  $Q$  が働いている場合を考える。曲げモーメントは  $M = Px + Q(D - y)$  となり、塗膜の変位  $y$  は、

$$\frac{y}{D} = 1 + \frac{\sin q \xi - q \xi \cos q}{q \cos q - \sin q}$$

$$\text{ここで、 } q^2 = \frac{12QL^2}{EBH^3}, \quad \xi = \frac{x}{L}$$

と表される。また、 $q$  を微小と考えると、上式を展開して、エネルギー解放率  $G$  は

$$G = \frac{3}{8} EH^3 \left(\frac{D}{L^2}\right)^2 \left(1 - \frac{2DQ}{5LP}\right)$$

となる。

接線力  $Q$  は、くさび片下面と生地との接触面に生じる摩擦力とつりあっていることを考えると、大きく見積っても  $P$  と同じオーダーのはずであり、(3)式と比較して、 $Q$  を無視しても付着エネルギーは数%大きめに評価されるだけである。

#### (c) 塗膜の非弾性変形

塗膜が柔らかい場合や塗膜の厚さに比べくさび片厚さが厚い場合には、Fig. 9 に示すように塗膜は非弾性変形をする。塗膜が線形変形をしない場合も、原理的には(3)式でエネルギー解放率が表されるので、付着エネルギーは評価できるが、少し工夫をすれば、線形弾性体として取り扱える。

Fig. 10 は、薄い塗膜の上にエポキシ樹脂を塗り、本来の塗膜を補強したものである。剥離膜の下部およそ四分の一が元の塗膜である。補強膜は塗膜の非弾性変形を拘束し全体として弾性変形をする。このエネルギー解放率の評価には補強膜の諸元も用いなければならないが、剥離は塗膜と生地との界面で発生しているので、それがそのまま塗膜の付着エネルギーを表している。

Fig. 10 の例では、剥離膜の厚さが  $0.82\text{mm}$  と厚いので、剥離長さも、 $3.66\text{mm}$  と長いですが、付着エネルギーは  $109\text{J/m}^2$  と、以前の例と同じような値が求まる。

## 3. 2 流体抵抗特性

Fig. 11 は表面状態が異なる 3 種の供試円筒の回転

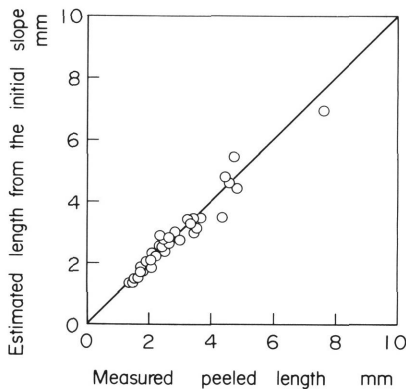


Fig. 8 Comparison of measured peeled length and estimated one from the initial slope.

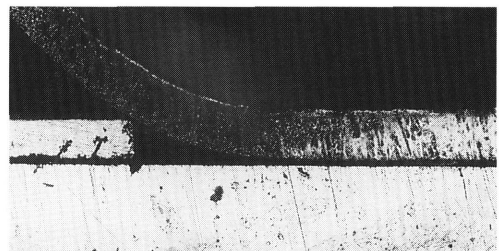


Fig. 9 Inelastic deflection of a thin paint film.

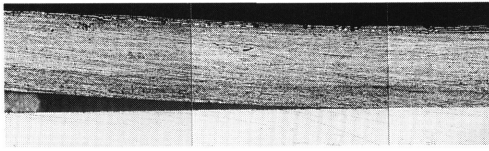


Fig. 10 Reinforced paint film with epoxy resin.

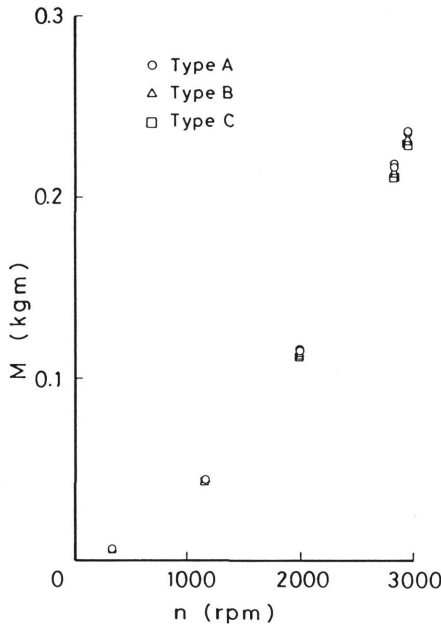


Fig. 11 Variation of cylinder driving torque due to rotational speed.

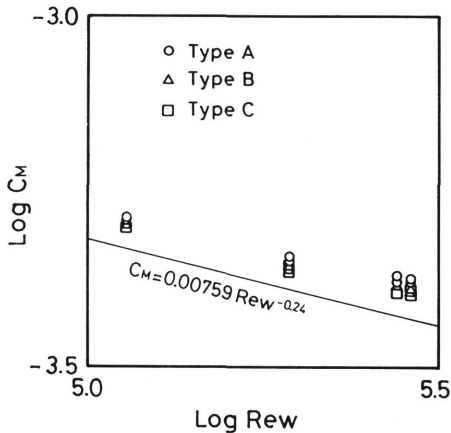


Fig. 12 Moment coefficient of rotating concentric cylinder.

速度  $n$  (rpm) を変化させた時の駆動トルク  $M$  (kgm) の変化を示す。実験における回転数範囲は300~3000 rpm であり、円筒外径  $d$  (m)、円筒周速度  $U$  (m/s)、および水の動粘性係数  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s) を用いた円筒レイノルズ数  $Re = Ud/\nu$  は  $2.7 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^6$  の範囲である。低回転速度では円筒表面状態の相違に基づく軸トルクの差は殆どないが、回転速度が増加するにつれその差が明確になっている。すなわち表面粗さが大きいほど軸トルクが大きい。

Fig. 12 は摩擦モーメント係数  $C_M$  と回転レイノルズ数  $Re_w$  の関係を示す。ここで

$$C_M = M / 2\pi\rho r_i^2 U^2$$

$$Re_w = (r_o^2 - r_i^2) U / 2\nu r_i$$

として算定した。ただし、 $\rho$  は水の質量密度、 $r_o$ 、 $r_i$  は外筒外径、内筒内径である。山田<sup>(6)</sup>によれば、滑らかな二重円筒の一方の円筒のみが回転する場合、Fig. 12 の実線で示すように：

$$C_M = 0.00759 Re_w^{-0.24}$$

の関係が成立するとしている。実験値のモーメント係数が回転レイノルズ数の増加につれて減少する傾向は実線と一致しており、また type A, B, C の順に、すなわち表面粗さが小さくなるほどモーメント係数が低下し、実線に近づいている。なお、本実験値は全て実線より上側に存在するが、これは本実験装置の外筒内面が滑らかでないことによる。

円筒内面が粗い場合の本実験結果と直接比較できるデータはないが、例えば Fig. 13 に示すムーディ線図<sup>(9)</sup>によれば、相対粗さ  $\epsilon/d$  が  $10^{-5}$  のとき、管摩擦係数  $\lambda$  は  $Re = 2.7 \times 10^5$  では滑らかな管とほぼ同じであるが、 $Re = 2.4 \times 10^6$  では滑らかな管の場合より大きな値を示している。すなわち、このことは本実験結果を支持しており、塗装による表面粗さの減少が摩擦係数を低下させ、モーメント係数を小さくする効果がある

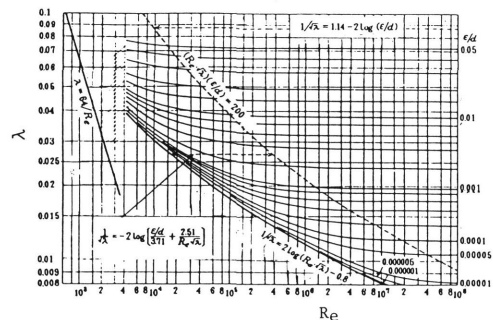


Fig. 13 Effect of surface roughness on pipe friction coefficient presented by Moody.

と判断される。

#### 4. 結 論

(1) 塗膜と生地間に、厚さが既知のくさび片を差し込み、塗膜に剥がれを発生させると、その剥離長さから塗膜の付着エネルギーが評価できることを示した。イソフタル酸系の塗料を用いた実験では、付着エネルギーとして100J/m<sup>2</sup>程度の値を得たが、エポキシ系接着剤とアルミ合金の接着エネルギーに非常に近い。

剥離長さの測定は、塗膜の断面を観察しなくとも、くさび片先端に接する塗膜の傾き角から推定できる。

また、この評価法は塗膜が弾性変形をしない場合でも、塗膜を別の材料で補強すれば応用できる。

(2) レイノルズ数が約 $2 \times 10^6$ において、塗装によって表面粗さを $4 \mu\text{m}$ から $1 \mu\text{m}$ に減少させると流体摩擦抵抗が約2パーセント低減できた。船舶のレイノルズ数はこの値より十分大きいから、塗装による流体摩擦低減効果が期待される。

この研究には、昭和62年度長崎大学学内特別研究経費が使われた。最後に、装置の製作および実験にあた

られた越智利彦助手、柳原武仁技官、黒川清司技官に感謝申し上げる。

#### 文 献

- (1) JISハンドブック, 29, 塗料, (1987), 日本規格協会.
- (2) A. J. Kinloch, "Adhesion and Adhesives", (1987), Chapman and Hall.
- (3) JISハンドブック, 20, 接着, (1987), 日本規格協会.
- (4) S. J. Bennett, K. L. Devries, M. L. Williams, International J. Fracture, 10, (1974), 33.
- (5) J. W. Obreimoff, Proc. Roy. Soc. London, A127, (1930), 290.
- (6) J. G. Williams, "Fracture Mechanics of Polymer", (1984), 31, Ellis Horwood.
- (7) R. A. Gledhill, A. J. Kinloch, S. Yamini, R. J. Young, Polymer, 19, (1978), 574.
- (8) 山田, 他 2 名, 日本機械学会論文集, B編, 47-420 (1981), 1194.
- (9) L. F. Moody, Trans. ASME, 66(1944), 671.