

亂流促進法について

田 宮 真

1. 乱流促進の必要性

流れの中におかれた物体の表面には境界層とよばれる薄層ができ、これが層流を保つときは乱流境界層に比しはるかに摩擦抵抗が少いことはよく知られており、いわゆる層流翼の構想もこれにもとずくのであるが、船の模型抵抗試験を行うときは逆に船体表面の流れを乱流にする工夫が行われている。Froude の比較則によつて抵抗試験が行われるため模型船のレイノルズ数 $Re (=VL/\nu, L$ は船の長) は実船の $10^8 \sim 10^9$ に対し $10^6 \sim 10^7$ で甚しく小さく、模型表面には殆ど常にある範囲の層流域が存在する。この拡がりは船速によつて変るが標準以上の 8 m 程度の長さの模型を使用しても、船の長さの 10% 内外に達し、低速で 30% 以上に及ぶ例も報告されており、しかも船形や水槽水の状態、曳行時の微細な振動等で一定せぬため、測定された抵抗値に対し十分の信頼がおけない。従つて適当な乱流促進法を使用して模型表面の全部又は一定範囲を乱流とし、実船との関聯を明確にする必要が生じたわけである。

2. 乱流促進法の種類

現在までにしられているものは次の 6 種である。

- | | |
|---------------|-----------------|
| 1. Trip Wire | 4. Vertical Rod |
| 2. Pin Head | 5. 格子 |
| 3. Sand Strip | 6. 反転水車 |

これらを簡単に説明する。1. は径 1 mm 程度の針金を船首附近の肋骨線にそつて表面にまきつけるもので、ほぼ船首から $0.05L$ の位置におく。これで境界層を乱そうとするわけで、強制剝離を起して遷移を実現する。2. は直径 $1/8$ in., 高 $1/10$ in. 程度のピンヘッドを約 1 in. 間隔に船首の後方 $0.01L$ 附近に船首にそつて植えつける。おのおののピンヘッドからの乱れは銀杏葉状に拡がつて船体全表面をおおう。3. は平均直径 0.7 mm 位の砂粒を幅数 cm の Strip に貼りつけるもので、Strip は船首線に沿う場合が多いが、最近水線にそつておいた例もある。いわば 2. を密にしたようなことになるが、最上流の砂粒から、下流になるほどその作用が低減するためか 2. に比して効果は劣るようである。4. は直径 $D = 3$ mm 内外の丸棒を船首前方 $50 \sim 100D$ に曳行し、これによつて生ずる乱れによつて乱流遷移を早めようとするもので米国では実用する水槽もあるらしい。(Trip Wire より有効に作用する実測例があるが、このときの速度に対し Trip Wire の径は過小のようである)。わが

乱流促進法として実用されている Trip Wire の装着についてその抵抗試験におよぼす影響、Wire の必要径、固有抵抗等を最近の実験結果と併せて解説した。

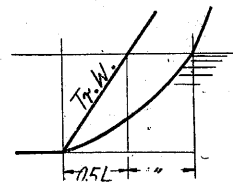
国で試用した結果は区々で十分信用できるとはいえぬようである。5. は風洞で使用される方法であるが、格子を曳航するとかなりの造波現象を呈し、好ましくない影響をあたえるので水槽では利用し難い。6. は三菱長崎水槽

で考察試用されかなり一致した抵抗値をあたえたものである。船体の前方に互に逆の小さいピッチをもつ二個の水車を前進させ、回転する水車によつて流れを乱す。若干の伴流を生ずるから船速に修正を行う必要がある。1~3 は直接的であり、4~6 は主流の乱れを強める故間接的であるが、現在の所 1, 2 がもつとも便利確実と考えられている。Paraffin 模型に対して装置も簡単であり、装置自体の抵抗も殆ど無視しうる程度で(この点では 2. は特に有利である)かなり実用されている。

3. Trip Wire の効果

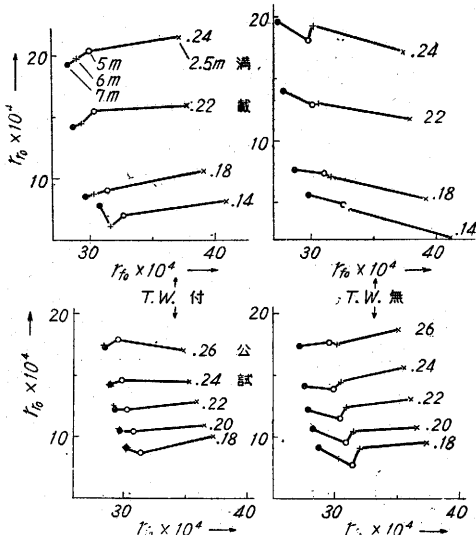
以下専ら Trip Wire について述べる。

著者は曾つて一模型船 (H と呼ぶことにする) に対し Trip Wire を附した場合と、裸殻のままの場合とを比較する機会をもつた。 H 船は船首部が強く前方に切上つたいわゆるマイヤー型であつて、Trip Wire は第 1 図のようにとりつけた。



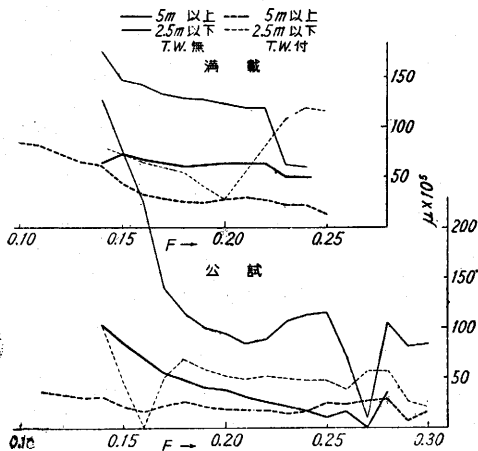
第 1 図 Trip Wire の取付位置 (H 船)

本船は本邦主要水槽 7 箇所で長 1.8 乃至 7 m の相似模型を分担試験し、その結果は通常の解析法に従い、全抵抗より摩擦抵抗を控除した残余の残余抵抗を係数値と比較した。摩擦抵抗係数 r_f 、残余抵抗係数 r_r とすると、 r_f に独立に、 r_r は同一フルード数 ($F = V/\sqrt{gL}$ g : 重力加速度) に於て一定であるというのが Froude の法則である。第 2 図はこの解析結果を $T.W.$ 付と無しとならべて示したものである。試験は満載、半載、公試三状態について行つたが半載状態は省略した。本図では $T.W.$ の有無に拘らず r_r の定常性 (F 一定) はあまりよくないが平均的にこれがついた時の方が一致は良好であり、点の不規則な散乱は少い。又著しいことは満載状態で r_r の r_f に対する傾向が Wire の有無で逆になること



第2図 Trip Wire の効果 (H 船)

と、公試状態では共通に点の散乱が少ないことである。第2図の r_f は完全乱流状態に対するものであるから満載状態では明かに $T.W.$ なきとき層流域の影響で r_f を過大に控除していることを示す。公試状態で Trip Wire の影響が小さいのは、層流域に対する吃水の影響であつて、一般に吃水が小さくなると層流域は減少し、従つて Trip Wire の効果が明かにならないのである。このことは戦後発達した船体表面層流域検出法によつて明かになつたことで、吃水の極めて小さい内火艇や河船の模型実験結果からも認められている。第2図を更に明かに示すものは第3図で、一定 F 毎に r_f の平均偏差 μ を求め、 F に対してプロットしたものである。検討の

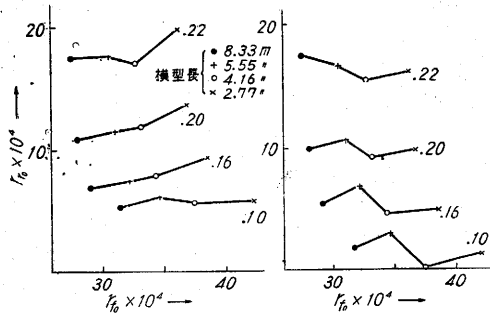


第3図 残余抵抗の平均偏差 (H 船)

結果、模型長 5m 以上と 2.5m 以下とを別のグループにまとめるのを適当と信じたので図には $T.W.$ の有無、模型の大小により 4本の折線が記されている。 $T.W.$ 付の μ の r_f に対する % であらわすと、 $F \geq 0.15$ では満載で 3% 以下、公試で 2% 以下で、未だ十分とはい

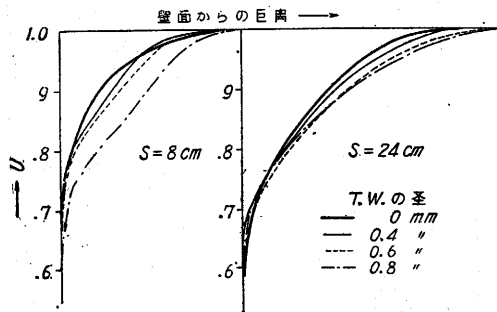
えないが、これには別に原因として考えられることがあるようである。併し第3図から直ちに船体抵抗試験の精度を云々することは不可であつて、全抵抗のうち残余抵抗の占める割合は第2図の最高速度においても最大模型の 40% 程度が最大であり、更にこれを実船の馬力に換算すると、その馬力差は低速では全く問題にならぬ程度となる。

第4図は第2図と同様の一例で、Trondheim の水槽試験結果(満載)である。 H 船の場合とよく似ているが、 $T.W.$ 無しの場合散乱は甚しい。



第4図 Trondheim 水槽の実験例(満載)

第5図は著者が風洞で行つた実験の一例である。長 1.20m, 最大厚 0.16m, 幅 0.25m の二つの円弧から形



第5図 境界層内流速分布

作られた模型の先端から 6cm (=0.05L) の距離に、直径 0.4, 0.6, 0.8mm の針金を横にはり、先端から 8cm, 16cm, 24cm の点で境界層内流速分布 U (境界層外端で 1.0 とする) を測定した。(16cm の分は省略) 風速は約 27m/s であつた。後述の推算式から明かなように、この際の Wire の径はいずれも適値よりかなり大きく、ために流速分布は十分乱流状態を示す。特に 0.8mm の場合はいわゆる Over stimulation の状況であつて、顕著な変曲点が現れている。24cm の点では殆ど $T.W.$ なきときと大差がないが、自然の遷移点が計算上 20~25cm (気流乱れにより異なる) に当ることから当然であろう。なお、測定位置の静圧の値は事実上何等の変化も蒙らなかつた。

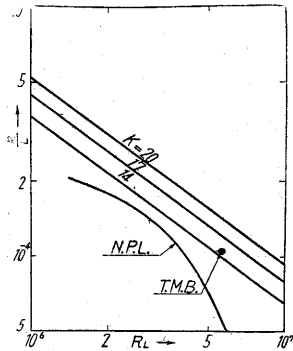
ここに附言しておきたいのは Hydroquinon-diacetate 法である。これは英国の Walker 等がはじめて発表したもので、Hydroquinon-diacetate をアセトンに溶かし、模型表面に吹付け乾燥したものを水槽中で曳行すると、

乱流域では Hydroquinon-diacetate が速に溶去り、層流域のみが白く残つてくる。この方法は模型の操作にやや不便があるけれども層流域の検出に極めて便利且つ具体的であつて、乱流促進法の効果判定に大いにあづかつてゐる。

この他色素の拡散模様観測、総圧測定、水中熱線流速計の応用等も既に実施されているが、総合的な結果を示す点では Hydroquinon 法がもつとも有効であろう。

4. Trip Wire の所要径

Trip Wire の所要径は取付位置によつて当然異つてくるが、通常の層流域の広さと、発生した乱れの減衰しないための条件および船体抵抗に対する Wire の抵抗の関係等を考え合せ、船首より 0.05 L の位置におくのが適当とされている。この位置で必要な直径を N. P. L. (Allan & Conn) で実験的に求めた例を第 6 図に示す。模型の長さは約 6 m であつて、乱流の発生は模型表面



第 6 図 Trip Wire の径

よりインクを流し、その流線を水中反射鏡で観測して確認した。又 T. M. B. で種々の乱流促進法の効果を熱線流速計で検討した際のデータから推定した値をも図中に示す。模型長は 7.77 m である。これらは純実験的に定められた値であるが、著者は前記 H 船の共同実験に際し、適当な所要径を決定する必要に迫られ、次の方法を採用した。

航研報告第 15 卷 No. 199 に谷一郎博士は層流境界層を保つために許容される表面突起の限界値をあたえる計算式として次の式を発表した。

$$\frac{k}{L} = \frac{K}{A} \left(\frac{VL}{\nu} \right)^{-3/4} \quad (1)$$

ここに

k=突起の高さ L=物体の長さ

V=一般流速

$$A = \frac{v_*}{V} \left(\frac{VL}{\nu} \right)^{1/4}$$

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \text{突起のない時のその点の摩擦速度}$$

K=常数

本式はレイノルズ数 ($v_* k / \nu$) がある限界値に達すると突起の下流が乱流に遷移するという考えで導かれたもの

で、この限界値 K として同報告は平板に対し 13, 対称翼型に対し 15 を与えている。(1) 式において k を Trip Wire の直径と考えれば、これを逆用してその下流に乱流を起すべき k の最小値が定められる。K としては 15 或は 20 をとれば十分であろう。(1) 式のうち A 以外は実験条件で直ちに与えられ、A は境界層外流速分布がわかつていればたとえば和田の方法(航研報告第 15 卷 No. 196)により次のように計算できる。

$$A = 0.769 U_1^{1/4} \left(\frac{dU_1}{ds_1} + \frac{0.323}{H_1} \right)^{1/4} \quad (2)$$

$$\text{但し } U_1 = \frac{U}{V}, \quad s_1 = \frac{s}{L}, \quad H_1 = U_1^{-0.91} \int_0^{s_1} U_1^{1.91} ds_1$$

U は境界層外端の流速、s は岐点からの長さである。

船体については波の影響のために U (又は U₁) の分布を概略的にも計算で求めることは困難である。そこで一応の目安として v_{*} に平板の値を入れてやると

$$A = \frac{v_*}{V} \left(\frac{VL}{\nu} \right)^{1/4} = 0.577 s_1^{-1/4} \quad (3)$$

となる。s₁=0.05 として (3) を (1) に代入すると

$$\frac{k}{L} = 0.821 K R_L^{-3/4}, \quad R_L = \frac{VL}{\nu} \quad (4)$$

がえられる。K=20, 17, 14 として k/L と R_L との関係を描くと第 6 図の 3 本の平行直線がえられる。先の実験結果と比較すると K=14 位でよいようである。N.P.L. とは傾向的にもかなり喰違があるが、波動の影響が主な原因であろう。平板の様な物体のまわりの U 分布と、船体の場合のそれとを模型的に比較するため U₁ を次のように仮定する。

$$U_1 = \left(\frac{s_1}{s_0} \right)^{1/n} \quad (5)$$

s₀ は常数でこれを仮に 0.1 とする。n が大なる程船首部は fin^e になり ∞ において平板の流れとなる。(5) を (2) に代入すると

$$A = 0.769 \cdot (0.1)^{-1/4n} \cdot (0.323 + 1.623/n)^{1/4} \cdot s_1^{3-n/4n}$$

ここで s₁=0.05 とすると、n=4~8 に対し A の平均値は 1.31, n→∞ に対し A=1.23 となる。約 10% 平板に比し A が大きく従つて k は小さくすむ。

波動を考慮すると (3) 式の dU₁/ds₁ は負になることもあり船首波の第一の山が船首又はそのすぐ近傍にあれば Wire の位置では dU₁/ds₁ > 0 であり、山が後にずれてくると dU₁/ds₁ は 0 から負となり、A は小さくつて平板の場合より大きい径を必要とする場合もありうる。しかし A の値の偏差は 10% 内外と考へてよく、若干太目の径を定めておけば十分である。

H 船について K=15 として (4) 式から所要の k を求めた結果は第 1 表に示す通りである。但し ν=1.3×10⁻⁶ m²/s とした。都合の好いことに k は模型の長さにはあまり影響されない。H 船の相似模型試験に当つてはすべての模型に 0.8 mm の Trip Wire を使用した。その結果は前述の通りであるが、1.8 m 以下の模型では明かに層流域の残存を示す例が起つてゐる。次節に述べるように 2 m 以下の小型模型では所要の k がかなり

第1表 k (mm)

F	0.1	0.2	0.3
L (m)			
2.5	1.0	0.6	0.45
4.2	0.95	0.55	0.4
6.0	0.9	0.55	0.4
$R_L \times 10^{-3}$ (6m 模型)	3.54	7.08	10.62

大きな固有抵抗を生ずるので、これに対しては Trip Wire 以外に有効な方法を講ずるか、又は小型模型による実験目的を大型模型とは全然別箇にするのが賢明であろう。

5. Trip Wire の固有抵抗

Trip Wire を取付けると一般に全抵抗は数%から十数%増加する。この大部分は Trip Wire 後方の層流領域が乱流に変化したための摩擦抵抗の増加によるものであるが、 $T.W.$ 自身の抵抗も若干含まれる。この抵抗は通常は無視しうる程度であるが一応検討しておく必要がある。固有抵抗を一般に次の形に書き現す。

$$R_{T.W.} = c \frac{\rho}{2} \cdot l k \cdot u_m^2 \quad (6)$$

l は Wire の長さ、 u_m は Wire の中心における境界層内平均流速、 c は実験的常数である。 c を直接定めた実験は数少ないが、ほぼ $0.6 \sim 0.9$ の範囲にありレイノルズ数 $u_m k / \nu = (1 \sim 5) \times 10^3$ の範囲でほぼ一定である。簡単のため $c = 1.0$ とし、流れを一様として平板境界層内流速分布を使つて u_m を求め、 $r_{T.W.} = R_{T.W.} / \frac{\rho}{2} S V^2$ (S は船体浸水面積) なる無次元抵抗係数を算出すると

$$r_{T.W.} = 0.60 \frac{l k}{S} \cdot \frac{k^2 V}{34 \nu x_0} \quad (7)$$

x_0 は船首から Wire までの長さで $0.05 L$ とすると

$$r_{T.W.} = 0.35 A R_L \\ = 0.35 B \cdot F \cdot \nu^{-1}$$

$$\text{但し} \quad A = \frac{l k}{S} \cdot \frac{k^2}{L^2}, \quad B = A \sqrt{g L^3}$$

A, B は実験の状態から直ちに計算できる値でそれぞれ $[0], [L^2 T^{-1}]$ なる次元を有する。 l, S は吃水によつて異なる。 H 船について B/ν の一例を求めると第2表の如く、又 $r_{T.W.}$ を全抵抗係数に対する % で示すと第3表のようになる。

第2表 $B/\nu \times 10^5$

模型長 (m)	7	5	2.5	1.8
状態				
満載	6.0	10.7	35.5	60.0
公試	2.8	6.2	18.3	31.0

第3表 $(r_{T.W.}/r) \times 100\%$

		模型長				
		7	5	2.5	1.8	
状態	満載	$F=0.14$	.08	.13	.35	.62
	公試	$F=0.24$	.11	.18	.51	.86
公試		$F=0.18$	.05	.10	.24	.43
		$F=0.30$	.05	—	.29	.47

第3表より見てこれらの模型に対する 0.8 mm の $T.W.$ の加える固有抵抗は 5 m 以上では問題にならぬことがわかる。(7) 式から明かなように $r_{T.W.}$ は k^3 に比例するから乱流促進効果を十分にするため k を 2.5 m 模型に対し 1.0 mm とすると $r_{T.W.}$ の値は約2倍となりこれは抵抗試験結果に対し無視できぬ影響をあたえる。 1.8 m 模型では 0.8 mm でも固有抵抗としては必ずしも無視できない。

便宜上 $r_{T.W.}/r$ の代りに $r_{T.W.}/r_f$ を用い、(r_f には Schoenherr の値を使う) $r_{T.W.}/r_f \equiv K' \leq 0.005$ を条件とすると k/L の許容最大値は

$$\left(\frac{k}{L}\right)_{\max} = \left(\frac{K'}{0.35} \cdot \frac{S}{Ll} \cdot \frac{r_f}{R_L}\right)^{1/3} \quad (8)$$

となる。普通の商船型では S/Ll の値はごく大略2とみてよいから

$$\left(\frac{k}{L}\right)_{\max} = \left(\frac{K'}{0.35} \cdot \frac{S}{Ll} \cdot \frac{r_f}{R_L}\right)^{1/3} \approx 0.31 \left(\frac{r_f}{R_L}\right)^{1/3}$$

この k/L は $R_L = 1, 2, 5, 10 \cdot 10^6$ に対しそれぞれ $0.5, 0.38, 0.27, 0.20 \cdot 10^{-3}$ となり第6図と比較して、 $R_L > 10^6$ ならば $K=20$ の直線より十分上にあることがわかる。

6. 結 び

乱流促進の問題は決して新しい問題ではないが、その効果の直接的な検証方法は最近になって発達した。このことは更に有効な乱流促進法の探究や、水槽実験の他の範囲(たとえば波浪中の諸実験)におけるその必要性の検討に有効な手段となり、試験結果の信頼度は恐らく上昇するであろう。小型模型は波、風の作用をうける航海状態での性能研究には種々の利点があり、これに対する有効な乱流促進法の研究は今後も重大な意義をもっている。最後に推進器の層流域については、少くとも実験的には適当な臨界レイノルズ数以上ではその影響が無視できるようで、乱流促進の問題は殆ど考えられていないことを附記する。(1953. 7. 8)