熱線流速計による模型船の境界層遷移域の測定

正員 田古里哲夫*

Hot Wire Measurements Applied to the Detection of the Transitional Flow
in the Boundary Layer around Ship Models

By Tetsuo Tagori, *Member*

Abstract

Recently, the need of measurements of the boundary layer around a ship model has been stressed in connection with turbulence stimulation used at the ship experimental tank. The author observed, formerly, the transition in the boundary layer along a flat plate by finding the velocity fluctuation through use of hot wire. And now the experiments on four ship models (2.5 m Hakubasan-Marun model, and 1.7 m series models-A, B and C) were carried out by the same method.

As a result, the state of the flow in the boundary layer around ship models was observed, and the areas of laminar, transitional and turbulent flows on ship models were determined. The effect of turbulence stimulation by a trip wire or plate studs was confirmed by this means, thereby making it clear that the area of the transition was considerable at low speed in spite of the use of these device. Moreover, it was found that the area of laminar or transitional flow was larger on the full ship model than the fine model.

目 次

§ 1. 緒言	§ 3. 実験結果
§ 2. 実験方法及び装置	§ 4. 結言

§ 1. 緒 言

熱線流速計は流れの速度変動の微細構造を知るための極めて有利な計測法であり、近年各所の試験水槽において使用が試みられている。著者は先に熱線流速計を実際に水槽試験に応用する第 1 段階として平板の境界層の測定を行い、熱線流速計により境界層内の流れの速度変動を定性的に検出することにより遷移域を測定することができ、またハイドロキノン・ディアセテート（以下 H.D と略す）塗膜による層流域判定法との比較を行い良好な一致をえた。今回はこれに引続き模型船について同様な方法による実験を行うこととし、H.D 塗膜による層流域判定、流線の測定、風洞試験等の各種の試験が行われた白馬山丸の模型を使用し、層流域遷移域及び乱流域を測定し、Trip Wire や Plate Stud の人工乱流促進法の効果を検討し、更に 1.7 m 系統模型を使用して層流域及び遷移域に対する船型の影響を調べた。

§ 2. 実験方法及び装置

模型船の周りの流れは平板の場合より複雑と考えられるので測定位置を多数設けることが望ましく、また 1 回の航走で数点同時測定できることは航走回数の節約の点からも有利であるから、3 位置同時測定のできるように今回は実験装置を 3 組使用した。

熱線は先の平板の実験と同じく直径 20μ 、長さ 3.5~4.5 mm のタングステン線を使用し 2 本の鋼製支持針間に電弧溶接によつて張り、支持針は絶縁のため塩化ビニール塗料（エンビ）により塗装した。

原稿受付. 1 月 11 日

* 東京大学工学部大学院学生

オシロスコープで観測する方の特性が平坦でなくなるので振動子の特性のための補償は行わなかつた。また熱線の時定数は計算値で約 0.2 m sec, Corner Frequency では約 800 c/s になるので、これも補償は行わなかつた。

模型船の曳航装置は、熱線の取付位置を変更するために、その都度模型船を曳引車上に引揚げること、曳引車の振動を模型船に伝えないこと、及び模型船に動揺を生じないことを考え、Fig. 5 に示すような装置を製作し、曳引車との間に厚さ 7 mm のスポンジ板を挟みダンパーとした。

毎回の航走に当つては次に述べる過程により実験を行つた。先ず模型船を曳引車上に引揚げて置き、船体表面に 3 組の熱線支持器具を熱線が相互に後流の影響を受けないような位置を選んで取付け、熱線を所定の位置（船体表面からの距離 0.3~0.8 mm）に調整した後模型船を曳引車から水槽に下す。模型船の曳航用梁に曳航装置を嵌め、中心線を合わせた後、所定の速度で曳航する。熱線電流を抵抗一定法により熱線と水との温度差が $\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$ になるように調整する。次にブラウン管オシログラフを観察して流れの性質を判定し、同時に電磁オシログラフにより記録をとる。

この結果えられたブラウン管オシログラフと電磁オシログラフとによる判定を総合して流れの性質を決定し、遷移域の位置を追跡した。

Fig. 5

Fig. 6 Body Plan of 2.5 m Hakubasan-Mar Model

§ 3. 実験結果

(1) 白馬丸 2.5 m 模型の実験

白馬丸は 122 m × 17.6 m × 10.7 m のマイヤー型の貨物船で、Fig. 6 は 2.5 m 模型の正面線図を示す。実験は結果の比較の便宜上、H. D 法による層流域判定が行われた時と同一状態で行うこととし、満載状態（模型船の吃水は 15 cm で等吃水）で、人工乱流促進法を施さない場合、Trip Wire を付けた場合、及び H. D 法による実験は行われていないが Plate Stud を付けた場合の 3 条件で曳航速度は 0.5 ($F=0.10$) 及び 1.0 m/s ($F=0.20$) の 2 種とした。

Fig. 7 2.5 m Hakubasan-Mar Model, Without Stimulation ($V=0.5$ m/s, W. T. = 16.8~14.9°C)

Fig. 8 2.5 m Hakubasan-Marui Model ($V=0.5$ m/s)

Table. 1

	AUTHOR'S EXPERIMENT	YOKOHAMA UNIV. TANK
LAMINAR FLOW	○	△
TRANSITIONAL FLOW	×	+
TURBULENT FLOW	●	▲

Fig. 7* 及び Fig. 8 は人工乱流促進法を施さない場合の速度 0.5 m/s の結果を示すもので、Fig. 7 の記号は Table. 1 に示す通りで以下全てこの記号による。H. D 法により測定された層流域と本実験によりえられた層流域は、船側においては完全に一致し、船底においてもかなり良好な一致を示している。また、船首船底中心線附近の層流域の存在も H. D 法による結果と一致してお

なり良好な一致を示している。また、船首船底中心線附近の層流域の存在も H. D 法による結果と一致してお

り、その外側では乱流域が存在し後方まで続いていることが見出された。この乱流域の形状は船首附近に微粒子状突起が存在する場合に生ずるものと類似しているが、本実験においては微粒子状突起は無く表面の状態は良好であつたので、船首船底附近の流れ自体に乱流促進の原因があるものと考えられる。Fig. 8 は船側、船底、船底中心線、及び船尾における流速の変動状態を示す電磁オシログラフの記録の一例である。船側においては水面に近い部分すなわち竜骨中心から上方に Half Girth Length (以下 G.L. と略す) 24~25 cm 附近では通常の遷移が見られたのに対して、船底彎曲部附近 (G.L. ≈ 19 cm) では Station No (以下 S.No と略す) 6 附近の遷移とみなされる領域に約 5 c/s の稍規則的な流速変動がみられた。この周波数の低い稍規則的な流速変動は例に示す通り船底では遷移域の前縁附近で常に現われている。

Fig.9 2.5 m Hakubasan-Marui Model, without Stimulation ($V=1.0$ m/s, $W.T=15.8\sim 14.9^{\circ}\text{C}$)

Fig.9 及び Fig.10 は人工乱流促進法を施さない場合の速度 1.0 m/s の結果を示すもので、H.D 法によりえられた層流域よりも本実験で測定された層流域は小さい。船底においては稍短かめではあるが大体一致しているのに対して船側や船底彎曲部はかなり短い結果が出ている。この不一致の原因については現在是不明である。遷移域は船底においては船側に比し甚だ短くなっている。Fig. 10 は船側、船底、及び船底中心線における流速の変動状態を示す電磁オシログラフの記録の例である。船側及び船底の外側部すなわち G.L. >14 cm の位置では通常の遷移現象がみられたが、船底の内側部では例に示すように規則的な流速変動がみられた。この規則的な流速変動は小振巾で現われ、船尾へ流れて行くのに従い急速に発達して振巾を増大し、次に不規則な成分が混じるようになり最後に完全な乱流となつている。この現象は Laminar Oscillation といわれるものではないかと思われる。あるいは本船型は流れが船底に流入する附近の曲率が大きいため局部的な剝離が起つているためかも知れない。しかし現在では断定を下すことは困難で更に詳細な実験を行えば明らかになるであろう。船首船底中心線附近の H.D 法では H.D 塗膜が残留し層流域と考えられた領域においても小振巾の 70~80 c/s の流速変動が認められた。

なお、白馬山丸 2.5 m 模型については横浜国立大学水槽においても類似の実験が行われている。測定位置は線図の 4 WL 上の数点であるが、その結果を比較してみると、速度 0.5 m/s では Fig.7 に示す通り完全に一致している。しかし速度 1.0 m/s においては Fig. 9 に示すように本実験で層流域と判定された領域が遷移となつており一致していない。

次に船尾附近の流れの状態を知るため、Fig.7 及び Fig.9 に示すように熱線流速計を船尾に取付けて実験を行ったが、風洞試験の結果剝離領域とみなされた位置においても流速の変動状態の甚だしい変化は認められなかった。H.D 塗膜による流線の測定の結果からは顕著な剝離は認められていない。Fig.8 の最下段は 0.5 m/s における結果の例である。

流速の変動分の概略値は出力計として使用する熱電対電流計が無かつたので波形による誤差を含んでいるが、曳航速度 1.0 m/s において S.No. 8.2, G.L. = 5.2 cm, 船体表面からの距離 $y=1$ mm の位置では平均値は約 6%, 最大振巾約 20% であつたがこの値は船体表面上の位置により異なるものと思われる。また船体表面からの距離が大になるに従い変動分は小さくなる。

後進時 (速度 0.4 m/s) における模型船の後流の変動を測定してみたが、平均値約 5%, 最大振巾約 15% であつた。

Fig. 11 は乱流促進法として直径 0.9 mm の Trip Wire を附けた場合の速度 0.5 m/s の結果であるが、遷移域がかなり残ることを示している。速度 1.0 m/s では Trip Wire の直後から完全に乱流となっていた。Fig. 1 は Trip Wire の位置に 2.2 mm×1.8 mm×1.0 mm の Plate Stud を 5.1 mm 間隔で 1 列植えた場合の速度 0.5 m/s の結果で、遷移域は Trip Wire の場合と同程度存在している。Plate Stud の直後では層流、遷移及び乱流が混じっているのは、その附近では層流域と Plate Stud により作られた乱流域とが縞状に存在していることを示すもので、その後方では乱流域は存在せず、遷移状態まで復帰している。速度 1.0 m/s においては Plate

Fig. 10 2.5 m Hakubasan-Marui Model ($V=1.0$ m/s)

Fig. 11 2.5 m Hakubasan-Marui Model
Turbulence Stimulation : 0.9 mm ϕ Trip Wire
($V=0.5$ m/s, W. T. = 15.3~14.6°C)

Fig. 12 2.5 m Hakubasan-Marui Model
Turbulence Stimulation : 1 Row of Plate Studs
($V=0.5$ m/s, W. T. = 14.8~14.6°C)

Stud の後方から直ちに完全な乱流となり、遷移域の存在は認められなかった。なお、Plate Stud 直後の乱れについてはその周波数は 0.5 m/s では約 50 c/s, 1.0 m/s では約 200 c/s の規則的なものがみられ、振巾は 0.5 m/s では小さく S. No. 7~8 でみられる流速変動の数分の 1 であったが、1.0 m/s では大差がなかった。Trip Wire の場合も流速変動の振巾に関しては同様の傾向がみられた。

(2) 1.7 m 模型の実験

本実験で使用した 3 隻の模型船の要目は Table 2 に示す通りで、Fig. 13~15 は正面線図を示す。このうち、B 船は国川丸の模型であり、他の A, C 両船は側面形が B 船と同一で、肥瘠係数がそれぞれ B 船より大及び小になっている。実験は吃水 9.4 cm で等吃水 (B 船の満載状態) で人工乱流促進法は施さず、曳航速度は 0.8 m/s ($F=0.20$) の 1 種のみで行った。実験の結果は Fig. 16~19 に示す通りで、肥瘠係数の最も大きい A 船が層流域は最も広く、船底彎曲部附近で最も伸びており圧力勾配の影響で層流の安定領域が広いことを示している。B, C 両船では層流域は同程度の面積であるが、遷移域はやはり肥瘠係数の大きい船の方が遙かに広く、また両船とも一旦層流から乱流になつ

Table. 2

MODEL	A	B	C
L_{pp} (M)	1.700	1.700	1.700
w	22.8	22.8	22.8
d (cm)	9.4	9.4	9.4
C_b	0.800	0.679	0.565

Fig. 13 Body Plan of Model-A

Fig. 14 Body Plan of Model-B

Fig. 15 Body Plan of Model-C

Fig. 16 1.7 m Series Models-A, B, C. Without Stimulation ($V=0.8$ m/s, W. T. = 14.4~13.8°C)

Fig. 17 Model-A ($V=0.8$ m/s)

Fig. 18 Model-B ($V=0.8$ m/s) Fig. 19 Model-C ($V=0.8$ m/s)

た後、遷移に復帰する領域が存在することが認められた。この領域は船体表面の中心線に対する傾斜角の最も大きい附近と略一致している。

Fig. 17 はA船の船側、船底、船底中心線、及び船尾における流速の変動状態を示す電磁オシログラフの記録の例である。船側では S.No 8~9、船底彎曲部附近 ($G.L. \approx 10$ cm) では S.No 5.8~6.8 において通常の遷移がみられたが、[S.No 7~7.6, $G.L. \approx 14$ cm] では例に示すように稍規則的な変動が混じっている。A船は肥型である関係からか、船側及び船底において遷移域附近で規則的な流速変動が多くみられた。船尾においては著しい肥型のため剝離現象が起つていると考えられ、船尾の水面の波形からも判断されたので、熱線流速計を船尾に取付け同様な実験を行った。その結果は Fig. 17 の通りで流速の変動状態から剝離域を適確に捕えることは困難であるが、剝離域と考えられる領域では流速の変動の周波数の高い成分が減少していることが認められる。Fig. 18 はB船、Fig. 19 はC船の船側及び船底中心線附近の流速の変動状態を示す電磁オシログラフの記録の例である。B、C 両船においては規則的な流速変動は殆

Fig. 20 Turbulence stimulated by an isolated Plate stud (Model-A, $V=0.8$ m/s)

Fig. 21 Turbulence stimulated by an isolated Plate Stud (Model-A, $V=0.8$ m/s)

んどみられず船底中心線附近とB船の S.No 9.2, G.L.=5.2 cm 附近に現われただけであった。

次にA船の船首 S.No 9.5 の位置に Plate Stud を1本植えて Plate Stud の作る乱れについて調べた。曳航速度は 0.8 m/s の一種のみとした。その結果は Fig. 20 及び Fig. 21 に示すように Plate Stud の直後においては約 80 c/s の小振巾の流速変動がみられ、その後方では一旦乱流となつた後遷移状態に復帰している。また H. D や安息香酸等の薬品塗膜法によつてみられる楔状の乱れの拡散の存在することも示している。

§ 4. 結 言

熱線流速計を白馬山丸 2.5 m 模型及び 1.7 m 系統模型 3 隻合計 4 隻の模型船の境界層内に取付けて乱れの定性的な検出を行い、その結果から模型船の境界層の遷移域の位置を測定した。その結果を要約すれば次の通りである。

- (1) 模型船の周りの境界層内の流速の変動状態が観察され、層流域、遷移域及び乱流域の位置を決定できた。
- (2) 白馬山丸 2.5 m 模型において H. D. による層流域判定法による結果と比較したところ、曳航速度 0.5 m/s では良好な一致がえられたが、1.0 m/s では H. D 法より小さな結果をえた。
- (3) Trip Wire と Plate Stud の人工乱流促進法の効果を調べた結果、低速においては両法ともに遷移域が存在することが認められた。
- (4) 1.7 m 系統模型の実験の結果、曳航速度 0.8 m/s では肥型の船型程層流域または遷移域が広いことが見出された。
- (5) 船尾剝離域の適確な検出は、本実験により観察された流速変動状態からは困難であるが、剝離域と考えられる領域においては通常の乱流の波形と少々異なる波形の記録がえられた。

終りに、本実験に当り御指導を賜つた山県昌夫教授、乾 崇夫助教授、卒業実験学生として装置の製作及び実験に努力された国安史郎、伊藤 弘の両君模型の準備に御協力下さつた五十嵐洋文、服部陽一の両君、並びに御協力を戴いた東大水槽職員の各位に対して厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) M. S. Macovsky and W. L. Stracke ; T. M. B. Report (1950)
- 2) M. S. Macovsky and J. P. Breslin ; T. M. B. Report (1950)
- 3) J. P. Breslin and M. S. Macovsky ; T. M. B. Report (1950)
- 4) H. Maruo and S. Matsubara ; Jour. of Soc. of N. A. Japan Vol. 97 (1955)
- 5) Experimental Tank Committee of Japan ; Report of the Experiments on the Hakubasan Maru (1953)
- 6) R. L. Gamelin ; SSPA Publ. No 3 (Jan. 1957)
- 7) 浜 良助 ; 東京大学理工学研究報告第 7 巻第 7 号 (1953)
- 8) 乾 崇夫・竹沢誠二 ; 造船協会論文集第 92 号 (1957)
- 9) 久保正大・北見鉄一 ; 昭和 26 年度東京大学工学部船舶工学科卒業論文
- 10) 伊藤康弘・川井 弘 ; 昭和 27 年度東京大学工学部船舶工学科卒業論文
- 11) 田古里哲夫・岩田達三・竹沢誠二・乾崇夫 ; 造船協会論文集第 98 号 (1956)