

実船における境界層の計測（第1報）：九州大学農学部水産調査艇”わかすぎ”による計測について

熊井，豊二

岡部，淳一

田才，福造

種子田，定俊

他

<https://doi.org/10.15017/4743445>

出版情報：応用力學研究所所報. 28, pp.13-59, 1967. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



実船における境界層の計測

第 1 報

九州大学農学部水産調査艇“わかすぎ”による計測について

熊井 豊二	岡部 淳一
田才 福造	種子田定俊
竹松 正樹	井上 進
辰野 正和	本地 弘之
天本 肇	山下 巖

概 要

小文は昭和41年度より43年度に至る文部省特殊研究費の援助を得て、九州大学応用力学研究所内で実施されている“実船における境界層の計測”に関する研究報告の第1報である。

§ 1 において、この研究の目的が終局的には船体の周りに作られる乱流境界層の特性を種々の船型と航行状態とに対して詳しく計測し、船舶流体力学の基礎的資料たらしめようとするものであることは勿論であるが、3ヶ年の短い期間内では、当面の目標を実船計測の方法および装置の開発という比較的狭い範囲の研究に限らざるを得ないことが述べられている。更に実用船舶を用いて流体力学的に価値のある程度に詳細且つ確実な実験データを得るためには、船腹に孔をあけて計器を水中に差し込むという従来の方法は一般に非実際的であり、船体を傷つけることなしに、数多くの点で容易に計測を行なうことができるように、計器の取り付けに関して何等かの新しい方法を考案する必要がある、我々は特殊の吸盤を試作することによつてこの目的を達成しようと試みるに至つたことが述べられる。

また本節の終わりには応用力学研究所に42年度より文部省機関研究費の交付されている“flow visualization の系統的研究”の一環として、船の後流の visualization によつて剝離流を含む後流の構造を明らかにしようとする試みの意義が説明されている。

§ 2 には吸盤についての説明と、実験室内で行なわれた性能テストで、ほぼ満足すべき結果の得られたことが記されている。

§ 3 は実験船および計測装置についての説明である。実験に使用された船は九州大学農学部水産実験所(福岡県宗像郡津屋崎町)所属水産調査艇“わかすぎ”(木造)で、その主な諸元は次の通りである。全長 11.655 m, 長さ(木船構造規則) 11.50 m, 幅(同前) 3.00 m, 深さ(同前) 1.30 m, 総屯数 9.5 T, 主機関中速ディーゼル 45 bhp, 計画最大速度 8.5 kt (4.4 m/sec)。実験は昭和42年 6 月 19 日より 21 日まで福岡県宗像郡津屋崎町の沖合で実施された。

計測の対象は(1)境界層内の速度プロフィール、(2)乱れの強さ、および(3)後流の visualization の3項目に限定され、(1)に対しては圧力管セットとマンメーターとの組み合わせ、(2)に対しては熱線流速計が用意された。圧力管あるいは熱線プローブは吸盤(大は直径 23 cm, 小 15 cm)に装着されて、潜水員が吸盤を船体に吸着することによつて、船体表面上任意の点で計測を行なうことができる。(3)に関しては銅パイプを船体の周囲に巻き、フルオレセインの水溶液をそれに導き、4ヶ所にあけられた小孔から海水中に噴出させ、着色水の運動を

観察することによつて後流の構造を明らかにすることを計画した。

§ 4 はそのようにして計測された結果の総括である。即ち吸盤は大小共海中で概ね予想通りの性能を示して船体表面に頑丈に吸着し、計画された種々の計測を可能にした。圧力管セット、マノメーター、熱線流速計も大体満足すべき性能を示した。速度プロファイルは船体6ヶ所で測定され、その結果は y/δ_1 対 u/u_{max} の無次元形で描かれている。ただし y は船体表面に立てられた法線に沿つて測つた距離、 δ_1 は境界層の排除厚、 u は縦方向（船体表面に沿い船の長さ方向）の流速、 u_{max} は y 軸上の u の最大値では境界層外縁での流速と考えられる。また6ヶ所のうち2ヶ所では大小の吸盤を相互に交換して計測の再現性を立証した。熱線流速計による乱れの測定の結果から次のことが明らかになった。船体表面近くの乱れは大きな振幅と低い周波数とを持ち、また測定点の y の値が完全にポテンシャル流れの領域に入れば乱れは完全に消失する。船の後流の visualization による観察の結果、両船側から流れ出る2本の螺旋状の剝離渦が存在すること、および船体後方に死水領域が形成されること等が確認された。

§ 5 は全論文の結びである。我々の考案した計測方式が“わかさぎ”実験で一応満足すべき成果を収めたことを述べて、実用船舶計測の予備テストとして計画された今回の実験の目的がかなりの程度まで達成されたこと、またこのテストを通じて明らかとなつた測定装置部品の欠陥が、次に実施された鹿児島大学水産学部所属“南星丸”（総屯数 45 T）による実験の準備に対して、甚だ有益な資料を与えたこと等が指摘されている。

今回の実験によつて流体力学的に信頼のおける実験資料を得ることは必ずしも最初から期待されていなかったし、また実際に測定量が甚だ貧弱で確定的な結論を述べることは躊躇されるが、そのような保留条件付きで次の諸点が列挙されている。(1) 船体表面上の境界層の厚さは、表面の曲率を無視し船を平板と見なして算出したものと大差ないこと。(2) 速度プロファイルは y の $1/7$ 乗よりはむしろ $1/6$ 乃至 $1/5$ 乗に近いこと。(3) 境界層内の乱れの強さは船体表面に近い程、また船尾に近い程大きいこと。(4) 強い乱れの存在する層の厚さは速度プロファイルから定められる境界層の厚さとほぼ一致すること。(5) 直進する船の剝離流は船のうしろに長く延びる2本の螺旋状の渦から成ること。(6) 旋回する船の剝離流は船尾附近の内側船側から斜めに流れ出すこと。(7) 船体後方には死水領域が作られること。なお(5)、(6)、および(7)の諸項目が普て種子田および天本の実施した小型水槽による模型実験の結果（応用力学研究所所報、第27号、昭和42年）と完全に一致していることは、極めて注目すべきものと思われる。

内 容

§ 1 まえおき

§ 2 吸盤の性能試験（実験室）

[2.1] 目的と方法, [2.2] 装置, [2.3] 結果

§ 3 実船計測の装置と方法

[3.1] 実験船と測定点, [3.2] 速度プロファイルの計測, [3.3] 乱れの測定,
[3.4] 後流の visualization

§ 4 実船計測の結果と考察

[4.1] 吸盤の性能試験（実船）, [4.2] 速度プロファイルの計測, [4.3] 乱れの測定,
[4.4] 後流の visualization

§ 5 む す び

写真集 (全 20 葉)

英文概要, 附図および写真の説明 (英文)

§ 1 ま え お き

九州大学応用力学研究所において昭和 41 年度より 3 年間にわたる文部省特殊研究費の援助を受けて, “実船における境界層の計測” という題目で実施されている 1 連の実験的研究は, 実際の船体表面に発達する 3 次元の乱流境界層の諸性質のうち,¹⁾ 特に, (1) 平均流速の境界層厚さ方向に関する分布,²⁾ 即ち所謂速度プロファイルの測定, 更にそれを基にして境界層剝離の検出. (2) 境界層内の乱れの測定, 更に海にもともと存在する乱れと境界層内に発生する乱れとの関係の検討. および (3) 剝離流を含んで後流の flow pattern の visualization. 以上の 3 項目について, 現地実験という特殊の状況で可能な範囲において, 出来るだけ詳細に測定し, それらから得られた結果を総合して船舶流体力学の基礎資料の 1 部にしようとするものである. 勿論現在実用に供されている船舶の形状や大きさは千差万別であり, その速度も広い範囲に変化し, 船の運動について定義される REYNOLDS 数および FROUDE 数の値もまた従つて相当の幅を持っている. それに加えて, 水面の状況は気象条件によつて大きな影響を受け, 油を流したような凧から暴風海面に至るまでの著しい変貌を示す. その上を航行する船もほぼ単純な直進から, pitching, heaving, 等を含む甚だ複雑な合成運動に至るまでの変化を有する. これらすべての場合を覆うことは, 僅か 3 年という時日と, 限られた予算および人員しか与えられていないこの特殊研究の勿論能くする処ではない. 我々は出来得れば, 将来相当長期間何等かの形でこの研究を継続して, 実際的に有用な資料を得るように努めたいと希望してはいるけれども, それはそれとして, 当面この 3 年間本研究の目標を実船の境界層に関する有用な資料を蒐集することそれ自体よりは, むしろ実船の境界層を近代流体力学の見地から測定するのに適した方法および装置を開発し確立することに限定するのは止むを得ないものと思われる.

実船の境界層内の速度分布 (速度プロファイル) を我々の知る限りで最初に測定したのは BAKER である.³⁾ 彼は特殊のピトー管を作製し, それを用いて *Snaefell* (長さ 315 ft, 幅 39.5 ft, 巡航速度 20~21 kt) および *Ashworth* (上と同じ順序で, 400 ft, 52.0 ft, 9~10 kt) の両船について, 船首附近 (*Ashworth* の前端から 87 ft の点), 中央部 (*Snaefell* で同じく 196 ft の点), 船尾附近 (*Ashworth* で同じく 304 ft の点) で境界層の速度プロファイルを測定した. 彼の得た結果は原論文の Plate III および IV にまとめられている. その測定で特に注目すべきことは, 速度プロファイルが “凧” (…in perfectly fine weather, with hardly a ripple on the surface of the sea, and only the lightest of the winds) と “しけ” (… the weather was very rough, the vessel rolling and pitching) との

1) 以下特にことわらない限り, 単に境界層といえば乱流境界層を指すものとする. 表題の “実船における境界層の計測” もその意味に解釈していただきたい.

2) ここに謂う平均とは 1 点における時間平均を意味する.

3) BAKER, G. S., Ship Wake and the Frictional Belt, *Transactions of North-East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders*, vol. 46 (1930), pp. 83-106.

相異なつた海象の下に得られていることであつて、この点に関して本研究の分担者の1人、岡部は嘗て簡単な考察を試みたことがある。¹⁾

同じく我々の知る限りで、次に境界層を実船について計測したのは PROHASKA である。²⁾ 彼は長さ 410 ft, 幅 62.0 ft の船の船尾附近 (全長の 3/4 程度) の点に pitot-log を取り付けて境界層内の速度分布を測定した。境界層外縁の流速は 14.0 kt および 12.6 kt である。実験の結果は原論文の Fig. 11 として示されているが、注意すべきことは同型船の同一対応点で測定された2つの無次元速度プロファイル間に若干の相違が見られることであつて、PROHASKA はこの原因として両船の表面粗さの差異 (一方は塗装直後, 他方は3週間以上経過) または trim condition の不同をあげているが断定してはいない。

以上 BAKER にせよ PROHASKA にせよ、船の外板に孔をあけてピトー管を海水中に差し込むという方式をとるために、ごく限られた数の点でしか測定を実施することが出来ないのは極めて当然である。しかしながら、船体上の境界層について、正確なあるいは総合的な知識を得るためには、船体上の相当多くの点 (その数を一概にいうことは勿論できないけれども、前2者の測定よりも格段に多い必要のあることは確かである) でできるだけ精密な測定を実行することが絶対に必要であり、そのためには外板に孔をあけるという従来の方式は実際的でなく、それとは異なつた新しい測定法を開発することが必須の要件となるのは自然のなりゆきである。

そのために我々は船腹上の任意の場所に取り付けることができ、しかも簡単に移動させることの可能な特殊の吸盤を設計試作し、ピトー管、熱線流速計等の計測器を吸盤に装着することを計画した。吸盤の構造および実験室での性能テストは §2 に詳しく述べられている。我々はこの吸盤に必要な改良を加えて実船境界層の測定を行なう方針を立てて、その実行計画を進めているのであるが、実験室内では一応満足すべき性能を示した吸盤その他の測定装置を、実船の船体に実際に装着して海上を航行した場合、果たしてその性能が充分に保持されるであろうかということについて、かなりの不安を持たざるを得なかつた。九州大学農学部所属水産調査艇“わかすぎ”による今回の実験 (昭和42年6月19, 20, 21日, 実験海域福岡県宗像郡津屋崎町の沖合) はこうした時点を選んで行なわれた1種の予備テストというべきであり、“わかすぎ”の境界層そのものを調査するというより、吸盤を初めとして準備された各種の計測器が船上で計画通りに作動して満足すべき実験資料が得られるか否かを確かめることの方がむしろ第1の目的であり、更にまたこの実験成績を検討することによつて、引き続き計画されている本格的な実船計測に際して測定すべき資料の種類、その他広くいつて実験計画そのもの、に対して必要な修正を行なおうとするのが第2の目的であつた。

次にここで付け加えておきたいことは、今回の実船計測に後流の flow visualization に関する項目が相当大きな比重でとり入れられていることである。これは吸盤を使用しての流速分布および乱れの測定と若干その趣を異にして、全く定性的な観測に属する。近時流体力学の諸分野で、流れの構造、所謂

1) 岡部淳一, G. S. Baker の実験 (1930) に対するノート, 応用力学研究所所報, 第3号 (1953), pp. 58-60.

2) PROHASKA, C. W., Trial Trip Analysis for Six Sister Ships using a New Method of Analysis, *Transactions of North-East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders*, vol. 78 (1962), pp. 417-444.

flow pattern, を何等かの方法によつて目に見えるようにしようという試みが有力な実験手段として俄かに脚光を浴びてきた。そのためには流れに色素を混ぜるとか、液と比重を等しくする固体粒を混入るとか、その他種々の方法が行なわれている。最近有名になった所謂水素気泡の方法もまたその1つである。我々は実船計測とは別に、flow visualization に関する系統的研究に対して昭和42年度より3年間にわたつて文部省機関研究費の援助を受けているのであるが、その研究の1環として、現在まで未解決のまま残されていた実船の後流の生成および構造を明確にするため、実用船を使用して大規模のflow visualization の技術を開発することにも努めたのである。

以下報告の内容の概略を述べると、前述のごとく § 2 で我々の計測装置のキーポイントである吸盤の実験室での性能テストについて述べる。§ 3 では実験に使用された水産調査艇“わかすぎ”の諸元、更に速度プロファイルの測定、乱れの計測、および後流の visualization, の各々について実験装置の詳細を述べる。§ 4 では上の3種の実験によつて得られた成果を述べる。§ 5 の内容はこれらのテストから導かれた船舶流体力学に関する若干の中間的な結論である。

本文を終わるに当たり、貴重な調査艇の使用を快く御認め頂いた九州大学農学部水産実験所長塚原博教授、同所員米康夫助教授に、また我々のために艇を巧みに運転して下さった古川哲二技官に深甚の謝意を表す。更に本実験を契機として、我々実験員のうち有志はアクアラングを使用しての潜水技術を習得することを開始し、その技術は現在一応の水準に達した。これは偏に塚原博教授および直接指導に当たられた水産学科大学院学生具島健二、中園明信両氏の御好意によるものであり、ここに厚く御礼申し上げる次第である。またこの実船計測で使用した吸盤は本学工学部水工土木教室栗谷陽一助教授の考案、設計になるものである。同氏からはその他実験技術全般にわたつて種々有益な助言を忝くした。更に、本研究に対して終始好意ある御援助を頂いている応用力学研究所員各位に、また屢々有益な討論によつて御示教を得た船舶流体力学研究委員会（会長本学工学部造船学教室上野敬三教授）に厚く感謝する。更に上記のごとく、本研究の経費の大部分は文部省特殊研究費によつて賄われた。文部省および九州大学事務局の御配慮に対しても心から感謝する。

§ 2 吸盤の性能試験（実験室）

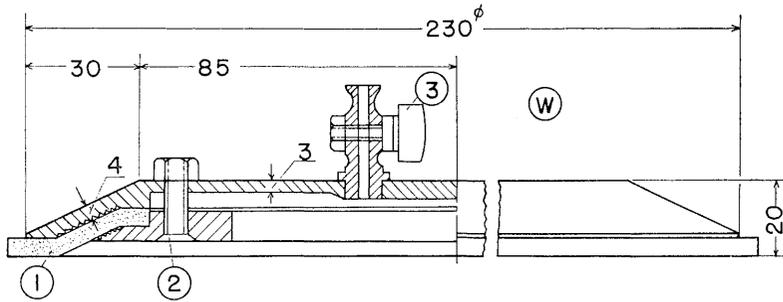
[2.1] 目的と方法

前節で述べたように、実船の船腹のまわりに作られる境界層に関して、速度プロファイル、乱れの強さ、等を測定して、その性質を明らかにするためには、船体を傷つけることなしにピトー管、熱線流速計、その他の測定装置を船腹上任意の点に、水の抵抗に耐えるだけ頑丈に固定し、しかも容易にそれを他の点へ移動させることができるような方法を見付けることが基本的な問題となる。

その1つとして、電磁石または吸盤を船腹に吸着させ、それによつて測定装置を固定させることが差し当たつて考えられる。前者は電力を増やすことによつて如何程でもその吸着力を増大させ得るという長所と、鉄船に対してだけしか使用できないという欠点とを併せ持つている。実船計測の計画を立てるに当たつて、小型船による予備テストを実施することが必要なことは初めから自明であつたし、小型船は一般に木造船であることをも考慮して、我々は実験の順序として電磁石方式よりも先に吸盤方式を検

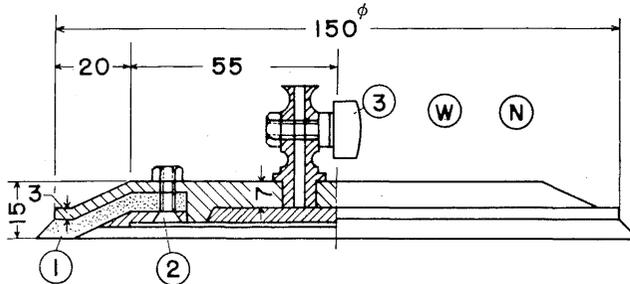
討することを適当と考えた。第 1 図, 第 2 図に我々の試作になる夫々直径 23 cm および 15 cm の吸盤の断面図を示す。以下これらを屢々夫々“大型吸盤”, “小型吸盤”と呼ぶことにする。この他縦 23 cm 横 15 cm の長方形の吸盤も試作したが, 現在まで実際に使用する機会がないのでこれは図を省略した。

航行する船体に取り付けられた吸盤に働く力は主として次の 3 つから成る (第 3 図)。(1) 吸盤自体



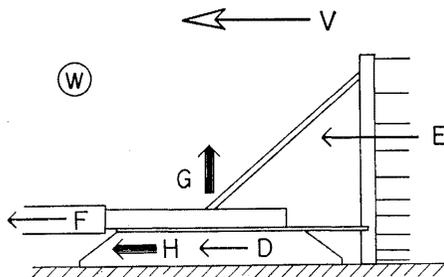
第 1 図 大型吸盤の構造

単位 mm, ① ゴムパッキン (厚さ 5 mm), ② ボルト (5/16"), ③ コック, 排水用 1 個, 注水用 1 個, 計 2 個. W は吸盤の滑り耐力試験の際ボンチで傷を入れた場所 (§ 2, [2. 3], 特に第 3 表参照. ただし実船に使用したものはこのような傷を入れていない.)



第 2 図 小型吸盤の構造

単位 mm, ① ゴムパッキン (厚さ 5 mm), ② ボルト (1/4"), ③ コック, 排水用 1 個, 注水用 1 個, 計 2 個



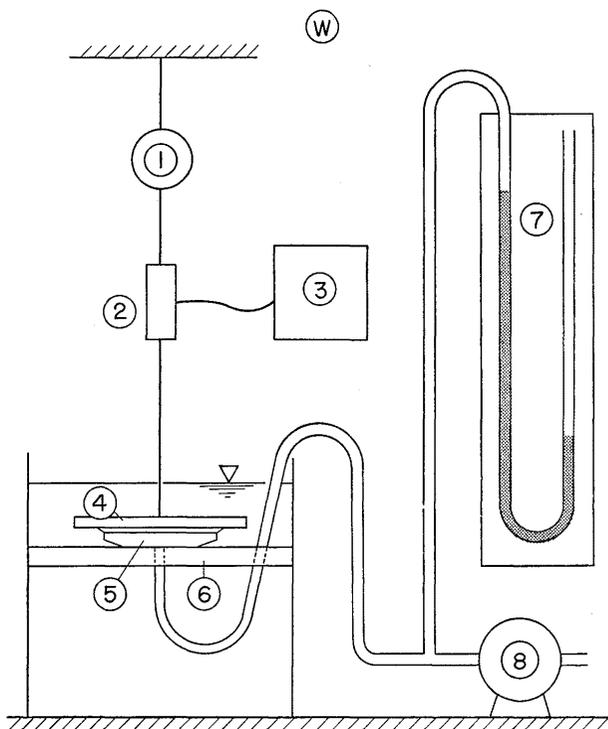
第 3 図 吸盤に働く力 (V は流れの方向)

図中 W は“わかすぎ” (第 1 報) の略号, 同じく N は“南星丸” (第 2 報) を示す. W, N を付けたものは第 1, 第 2 報の両方に共通な図である。

の受ける水抵抗 D 、(2) ピトー管のステムに働く力 E 、(3) 吸盤からマンオメーターおよび吸水ポンプに至る管類をまとめて入れた1本の大きなチューブに作用する水の抵抗が、そのチューブを経て吸盤に働く、その力 F 。これらの力は相集まつて吸盤をその1方から引き剥がそうとする作用を持つであろう。このような複合力に対して吸盤がどのように抵抗するかは極めて複雑な問題であるが、差し当たり基礎実験として、外板に垂直に吸盤を引き離そうとする力 G と、外板に平行に働いて吸盤を滑らせようとする力 H とを別々に吸盤に作用させて、吸盤が夫々どの程度の力にまで耐え得るかをテストした。

[2.2] 装 置

第4図は垂直引き離し（以下単に“引き離し”という）耐力試験装置の概略を示すものである。70 cm 立方（2面ガラス張り）の木製水槽を利用し、5 cm×5 cm×5 mm のアングルを水平に水槽の内側に向かい合つて2本取り付け、それに直径 23 cm の吸盤を上向きに固定し、¹⁾ 更にその上に供試板（船の外板の模型）を載せて吸着させる。水槽内の全水深は約 60 cm で、勿論吸盤および外板模型は常に



第4図 吸盤の耐力試験装置（垂直引き離し）

- ①チェインブロック、②張力計（出力歪量 $2010 \times 10^{-6}/T$ 、直線性フルスケール $\pm 0.5\%$ ）、③静歪指示計、④供試板、⑤吸盤、⑥アングル、⑦水銀マンオメーター、⑧排水ポンプ（0.4 kW, 100 V）

1) テストを行なつたのは大型吸盤だけである。その成績から小型吸盤の性能は大体推定出来る。

水面下にあるが、その水深は高々 20 乃至 30 cm の程度で、1 気圧の水柱 (約 10 m) に比べては充分小さい。従つて吸盤に作用する静水圧の影響をこのテストでは無視して差し支えない。水平滑り (以下単に“滑り”という) 試験の場合は、吸盤と供試板とを縦向きに取り付けることがこの図と違うだけである。何れの場合にも、吸盤を固定して、板の方を天井の梁から釣り下げた 1 トンのチェインブロックで真上に引つ張ることとした。

吸盤を吸着させる船の外板模型 (供試板) として、鉄船および木造船に対応して夫々次のような鉄板および木板を選んだ。(1) 鉄板: 解体された実船の外板 (厚さ約 1 cm) に速乾性ペイントを刷毛塗りしたもの。(2) 木板: 何れも厚さ約 3 cm の杉板に上と同じ塗料を塗つたもの。そのうち、(A) 30 cm×35 cm の 1 枚板、(B) 30 cm×15 cm, 30 cm×20 cm の 2 枚を隙間 3 mm をあけて船釘で継ぎ合わせ、継ぎ目を防水粘土で埋めたもの。

[2.3] 結 果

力の計測は荷重によつて生じるロードセルの歪をストレインメーターで測定することによつて行なわれた。即ち、ロードセルの表面に貼り付けた歪ゲージの抵抗変化をブリッジの不均衡出力として検出し、増幅した上で指示させる。装置の都合で 300 kg までの検定しか行なっていないが、我々の耐力テストでは最大荷重が 400 kg 程度であるので、實際上差し支えないものと思われる。荷重と測定器の歪量との校正結果と、引き離し耐力の試験結果とを夫々第 1 表および第 2 表に示す。吸盤の有効直径をかりに 22 cm と見積ると、その内部が完全に圧力零になつたとして吸着力は $(\pi/4) \times (22)^2 \times 1.033 \text{ kg} = 393 \text{ kg}$ であり (静水圧省略)、上の結果と比較すれば、若干水漏れのある 3 つの場合を除き、ほぼ理想的な吸着性能を示すものといつてよいであろう。

第 1 表 計 器 の 検 定 (荷重対歪)

荷 重 (kg)	歪 量 $\times 10^6$	
0	0	0
100	196	196
200	395	396
300	596	596

第 2 表 垂 直 引 き 離 し 耐 力 試 験 結 果 (大型吸盤)

試験番号	供 試 板	ゴ ム	吸 盤 内 側 (第 1 図 の mm 印 の位置)	最大引き 離し耐力 (kg)	備 考
1	鉄板	細工なし ゴム厚さ 2mm	細工なし	305	若干水漏れがある
2	鉄板, 表面に塗装が剥げる程度傷を入れる	外側削り取る ゴム厚さ 5mm	同 上	360	
3	2 に 同 じ	2 に 同 じ	同 上	275	若干水漏れがある
4	木板 A ([2.2] 参照)	2 に 同 じ	同 上	355	
5	木板 A, 表面に鋸でザラザラする程度傷を入れる	2 に 同 じ	同 上	253	若干水漏れがある

次に滑り耐力試験の場合、供試板とゴムとの間の摩擦が当然問題となるので、滑り止め対策として、種々の工作を施した。¹⁾ 即ち、(1) 板に接するゴム面に細かい砂粒をゴムのりで接着する。(2) ゴムの中央部を削り取る。(3) ゴムの外側を削り取る。(4) 吸盤とゴム板との接触面（第1図参照、第2、第3表には吸盤内側と記した）にポンチで約200ヶ所傷を入れる。(5) 供試板（木板）に鋸で深さ1mm程度の傷を入れる。試験の結果を第3表に示す。この結果から見る限り、木板の表面に傷をつけて摩擦係数を大きくするのが最も効果的であるように思われる。この試験を行なった時までは、吸盤に作用する力に関してあまり的確な見積もりをすることができなかつたので、滑り防止のため種々の工夫を予めテストしておくことを必要と考えた。しかし“わかすぎ”実験では滑り止めに特別な考慮は払われていない。

第3表 水平滑り耐力試験結果（大型吸盤）

試験番号	供試板	ゴム (厚さ 5mm)	吸盤内側 第1図の 印の位置	最大滑り耐力 (kg)	備考
1	鉄板	細工なし	細工なし	65まで安定	1から4迄は滑り出す点を測定していない
2	鉄板	同上	ポンチで傷を入れる	60まで安定	
3	鉄板、表面に塗装が剥げる程度傷を入れる	同上	同上	65まで安定	
4	3に同じ	接触面に砂を接着	同上	67まで安定	
5	木板 B	同上	同上	65まで安定 85以上滑り出す	65～85 不安定
6	5に同じ	中央削り取る	同上	同上	同上
7	木板 A	同上	同上	70まで安定 77以上滑り出す	70～77 不安定
8	木板 A、表面に鋸でザラザラする程度傷を入れる	同上	同上	80まで安定 93以上滑り出す	80～93 不安定
9	木板 A	外側削り取る	同上	75まで安定 90以上滑り出す	75～90 不安定
10	木板 A、表面に鋸でザラザラする程度傷を入れる	同上	同上	95まで安定 100以上滑り出す	95～100 不安定

註 不安定というのは一定荷重のもとで、時間の経過とともに歪測定器の読みで2～3目盛程度（荷重に直して1～1.5kg）歪量が減少することをいう。

（追記）“わかすぎ”実験およびその後行なわれた“南星丸”実験を済ませた現在の意見を述べるに、吸盤装置は特別に滑り止めを施さなくとも（大型吸盤は勿論、直径15cmの小型吸盤でさえも）一旦吸着すると、上記程度の小型船に関する限り、少なくとも船速約4m/secに対する水抵抗には充分耐え得るものようである。チューブが長くてその部分の抵抗が大きい時には、処々にダミーの吸盤を取り付ければよいであろう。船体外板上の凹凸は摩擦抵抗を増大するという利点よりも、むしろ吸盤のゴム面と外板との密着を不良にし、水漏れの原因となり、吸着性能の低下をもたらす欠点の方が大きいように思われる。

1) 後に述べるように、これらの滑り止め対策はこの耐力試験に際してだけ実施されたものであつて、“わかすぎ”および“南星丸”の実験では実行されていない。勿論“わかすぎ”実験では(4)の工作を施した大型吸盤1個が他のものにまじつて使用されたわけであるが、それらの性能の間に特別な相違は認められなかつた。

吸盤と排水ポンプとをつなぐチューブの最高位置と海水面との高さの差は“わかすぎ”実験では 1 m 程度であつたが, “南星丸”では約 2 m となつた。これが 10 m を越えると吸盤はその機能を全く失うことになる。このことについては第 2 報で若干詳しく述べるつもりである。¹⁾ なお本節に述べた実験は本研究所助手長浜智基氏が流体研究部所属 (現在材料研究部所属) 当時担当した処であつて, ここでも同氏に謝意を表す。

§ 3 実船計測の装置と方法

本節では今回の実験に使用されたいろいろの測定装置と, それらによる計測方法を測定項目別に述べる。ただし得られた結果およびそれについての考察は, 次節で同じく項目ごとに記すことにする。

[3.1] 実験船と測定点

計測の対象として使用されたのは, 九州大学農学部水産実験所 (福岡県宗像郡津屋崎町 2506) 所属水産調査艇“わかすぎ”であつて (写真 1 および 2 参照),²⁾ その主な諸元は下に示す通りである。全長 11.655 m, 長さ (木船構造規則) 11.50 m, 幅 (同前) 3.00 m, 深さ (同前) 1.30 m (吃水線以下の船体には薄い銅板が張つてある), 計画総トン数 9.50 T, 主機関中速ディーゼル 45 bhp, 計画最大速度 8.5 kt (約 4.4 m/sec)。

参考のために実験船の REYNOLDS 数と FROUDE 数とを計算してみる。今代表長さ L として船の全長をとり, 代表速さ U として次の 2 つの船速を仮定する。(1) 2 m/sec (船体の周りの flow visualization に関する観測を行なうに際しては, 白波の発生を避けるためにこの程度の低速運転を行なつた。)(2) 4 m/sec (速度プロファイルおよび乱れの計測に当たつては, 大体 3.5 乃至 4 m/sec の船速を用いた。) 動粘性係数 ν : 表面附近の海水の温度は, 数回にわたる測定の平均値として約 23 °C であつた。この温度で海水の動粘性係数は大略 $0.92 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ と推定される。³⁾ これらの値に対応して REYNOLDS 数 UL/ν は (1), (2) の場合夫々大約 2.5×10^7 および 5.1×10^7 であり, また FROUDE 数 U/\sqrt{gL} (g は重力加速度 9.8 m/sec^2) は夫々 0.19 および 0.37 である。

第 5 図に実験船“わかすぎ”の線図を船尾部を主にして示す。この線図から明らかなように“わかすぎ”はビルジ部分の稜線 chine line で境されたほぼ鉛直の舷側部および平坦な船底部, それと cliff cut の船尾部とから成る。A, B, C, D は速度プロファイル および乱れの計測を実施したステーション, E は後流の visualization に際して染料を吐き出したステーションである。このうち流速分布を計測したのは A_1 (大), A_2 (大, 小)*, B_1 (大), C_1 (大, 小), D_1 (大), D_2 (小) の 6 点, 乱れを測定したのは A_1 (小), A_2 (大, 小), B_1 (小), C_1 (大, 小) の 4 点である。⁴⁾ 写真 3 および 4 は吸盤取り付け作

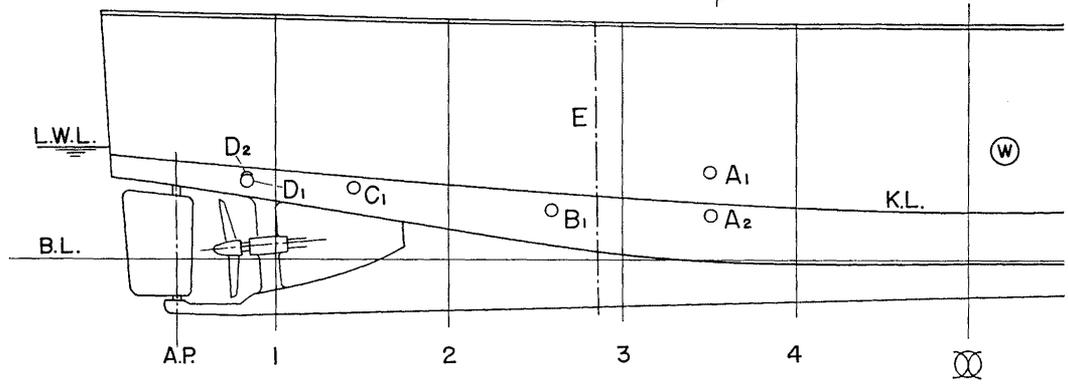
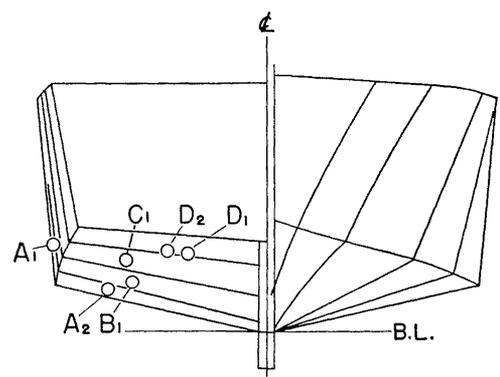
1) 第 2 報, § 4, [4.2] 参照。

2) 写真はすべて論文の終わりにまとめて付ける。

3) GOLDSTEIN, S., *Modern Developments in Fluid Dynamics*, vol. I (1965), Dover Pub., I, 2, TABLE 1, p. 5, の値を海水の比重 1.025 で割つて得られた。

4) 例えば A_1 (大), D_2 (小) と記したのは, A_1 点に直径 23 cm の大型吸盤を, D_2 点に直径 15 cm の小型吸盤を装着したことを意味する。ただし第 5 図に記入したこれらの点は吸盤の中心位置を示している。実際に速度または乱れを測定した位置は, これらの点と圧力管または熱線プローブの長さだけの誤差があることになる。同一点に大小の吸盤をつけたのは測定の再現性を見るためである。然し流速の A_2 点 (*) の計測に際しては, 2 つの吸盤中心の位置にあとで 3 cm 程の誤差を認めたことが記録されている。

主要寸法	
全長	11.655 m
長さ (垂線間長)	11.000 m
長さ (木船構造規則)	11.500 m
幅 (同上)	3.000 m
深さ (同上)	1.300 m
計画総屯数	9.50 T
主機関中速ディーゼル	45 bhp
計画最大速度	8.5 kt



第5図 わかすぎ船図

業の実況を, 5 および 6 は 夫々船側 および 船底に 取り付けられた流速測定用圧力管セット (後述) を示す. なお水中撮影にはニコノス (レンズ f 28 mm, F3.5 付き) が使用された.¹⁾

最後に実験中の気象条件について簡単に付け加える. 観測が不十分で海面の状況を数量的に明確に表現出来ないのは甚だ残念である. 6月19日—午前: 前半は風, 後半は風が少しずつ強くなった. 午後: 波がかなり高くなり, 舷側に付けた圧力管の先端が時々海面上に現われた. 従つて舷側の速度プロフィール測定を中止した. 6月20日—午前: 前半は風, 後半は北の風 5 m/sec 程度で所々に白波が見えた. 午後: 北の風 8 乃至 9 m/sec で白波が見え, 船はかなり pitching した. 6月21日—午前: 前半は風, 後半南東の風 4 m/sec, 海面は比較的穏やかで白波は見えない. 午後: 風.

これに対して流速分布の測定は次のように行なわれた. ただし (大), (小) は前述の略記号である. A_1 (大)—19 日午前前半, A_2 (大)—19 日午後後半, A_2 (小)—19 日午後, B_1 (大)—19 日午後, C_1 (大)—21 日午前後半, C_1 (小)—19 日午後最終, D_1 (大)—21 日午前後半, D_2 (小)—21 日午後後半.

一方また乱れの測定は次の通り. A_1 (小)—20 日午後後半, A_2 (大)—20 日午後, A_2 (小)—20 日午前後半, B_1 (小)—20 日午後, C_1 (大), C_1 (小)—20 日午後.

以上大まかにいつて, 流速測定は比較的波の静かな時に, 乱れの計測は比較的波の高い時に行なわれたといつてよいであろう. flow visualization は 20 日, 21 日の午前, および 21 日の午後, 何れも海が凪いでいる間に試みられた.

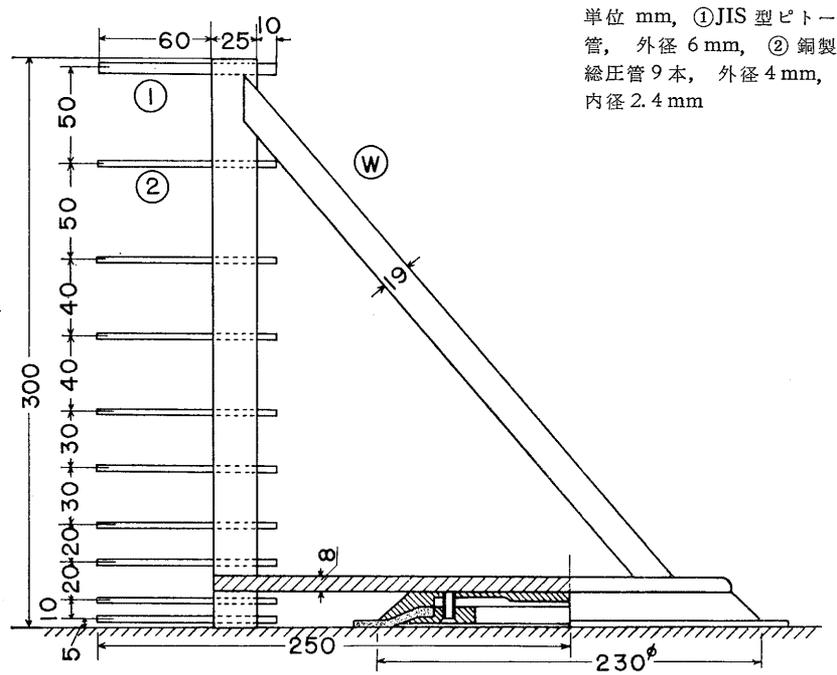
[3.2] 速度プロフィールの計測

平均流速の境界層の厚さ方向に関する分布, あるいは簡単に境界層の速度プロフィール, を測定するには銅パイプ (外径 4.0 mm, 内径 2.4 mm) を利用した手作りの総圧管 10 本または 9 本と, JIS 型外径 6 mm のピトー管 1 本とを組み合わせた大小 2 種の櫛型圧力管セットを用意し, 大きい方のセット (総圧管 9 本) は 23 cm 吸盤に, 小さい方のセット (総圧管 10 本) は 15 cm 吸盤に予め取り付けおき, それらを適宜使いわけた. 吸盤に装置された大小圧力管セットの詳細は, 第 6 乃至第 10 図および写真 7, 8 に示されている.²⁾

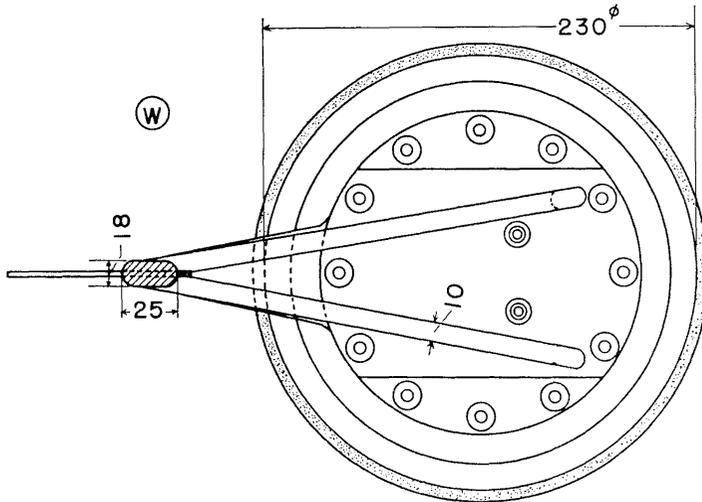
これらの図に示されているようにピトー管はセットの 1 番外側に取り付けられており, 船体表面から垂直に夫々約 30 cm および 16 cm だけ離れた点の総圧と静圧とを測定するようになっている. 圧力管セットに感じた圧力は, 船の甲板上に設置された多管マンオメーターまでビニール管を伝わつて導かれる. マノメーターの上端は真空ポンプで減圧された容積約 2.3 lit の真空チャンパー (第 11 図) に接続されていて, このチャンパーの圧力を加減することによつてマンオメーターの水頭を適当な高さに調節することができる. 速度プロフィール測定装置全体の配置は第 12 図に示されている. マノメーター内の水頭

1) 水中フラッシュを併用した.

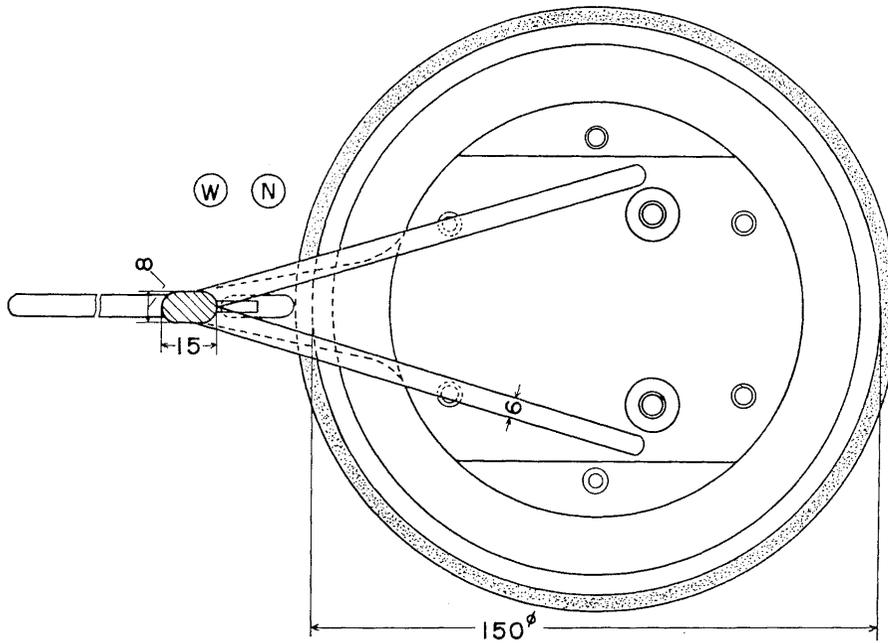
2) 第 6, 7 両図で, 最下段の圧力管の高さは吸盤が船体表面に吸着した時の寸法である. ゴム板が圧迫されて縮むのでこの寸法は予め定めるわけにゆかない. 第 15, 16 両図の熱線流速計についてもこの事情は同じである. また圧力管にしても熱線プローブにしても, その先端は吸盤の中心から共に 10 cm 以上突き出ているので, 船体の表面が大きい曲率を持っている場所では, それらの先端と船体表面との距離が一般に図に描かれた値と多少違つてくるのは当然であるけれども, この実験ではその誤差を無視することにした.



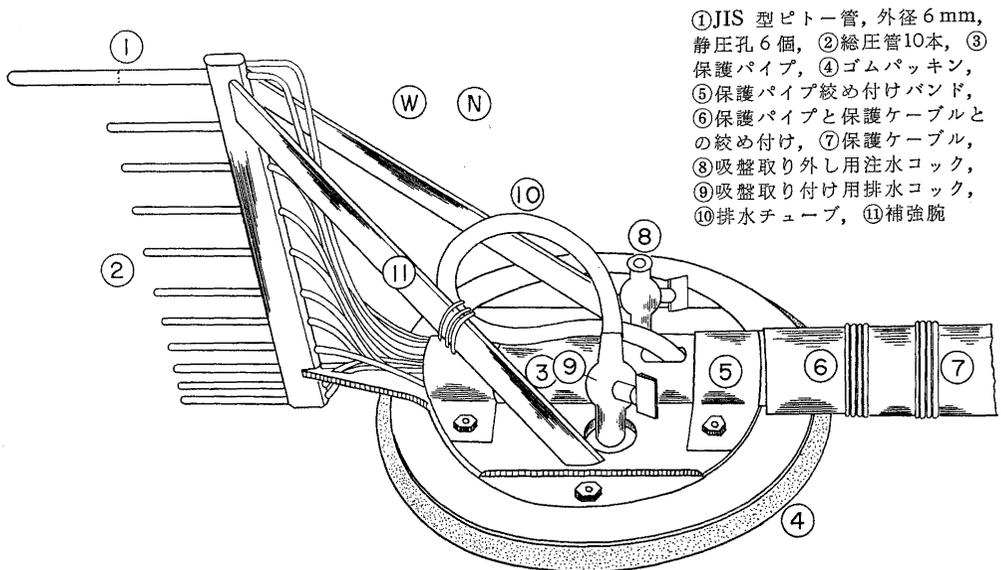
第6図 大型吸盤に取り付けられた圧力管セット (側面図)



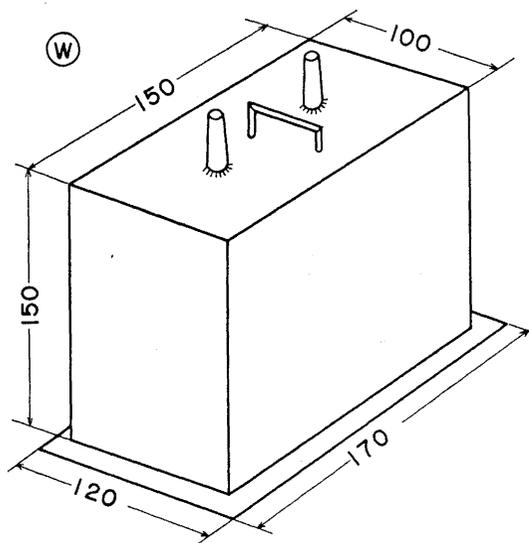
第8図 大型吸盤に取り付けられた圧力管セット (平面図)



第9図 小型吸盤に取り付けられた圧力管セット (平面図)

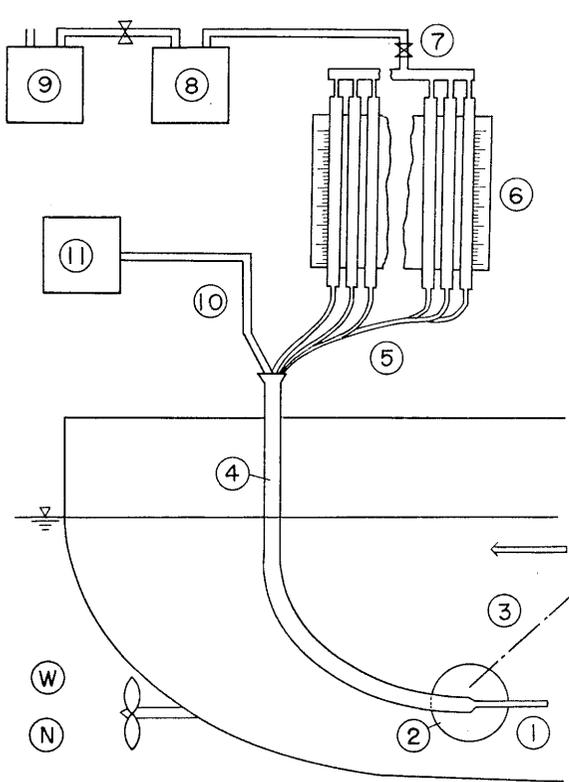


第 10 図 小型吸盤に取り付けられた圧力管セット (鳥瞰図)



第 11 図 真空チャンバー (鳥瞰図)

単位 mm, 真鍮製, 板厚 0.8 mm



- ①ピトー管, 総圧管, ②吸盤, ③安全ワイヤ, ④保護パイプ (ビニール製, 長さ 5 m, 外径 25 mm, 内径 21 mm), ⑤ビニールパイプ, ⑥マノメーター (ガラス管 12本, 長さ 1.2 m, 外径 8 mm, 内径 6 mm), ⑦コック, ⑧真空チャンバー (容積 2.3 lit), ⑨真空ポンプ (到達圧力 10^{-2} mmHg, 排気速度 18 lit/min, 100 W, 700 rpm), ⑩排水パイプ (外径 7 mm, 内径 5 mm, ビニール製), ⑪排水ポンプ (ヘッド 10.5 m, 100 V, 60 cycle/sec, 0.4 kW)

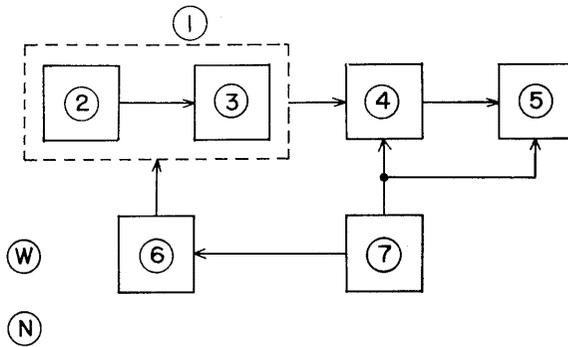
第12図 速度プロフィール測定装置の配置

は肉眼でも充分読みとれるが, カメラで撮影して大きく引き伸ばし, 記録と読みとりとを兼ねることにした. 写真9は吸盤を吸着させるのに使用された排水ポンプ, 10は真空ポンプと真空チャンバー, 11はマノメーター装置の上部, を示している.

[3.3] 乱れの測定

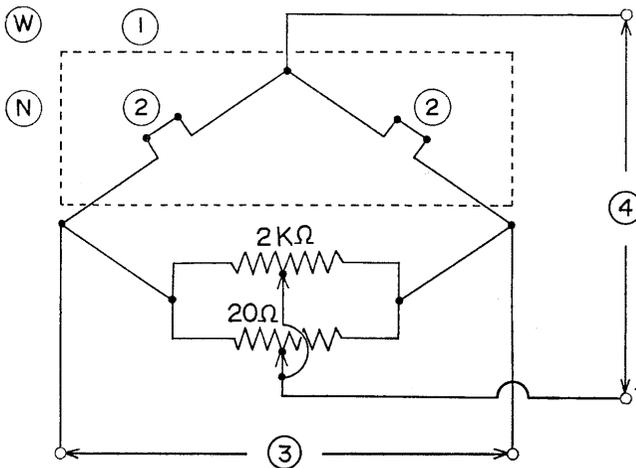
船体表面に沿う境界層の乱れを電氣的に検出, 記録することによつて, 乱れの構造を定性的に調べ, 併せて強い乱れの存在する層の厚さを測定して乱流境界層の厚さを定めるという目的で, 特殊の熱線流速計を設計, 製作した. これは熱線の方向と流れの方向とのなす角度の大小によつて, 冷却作用の強さが異なるという事実を利用したもので, 使用されたプローブは長さ 7 mm, 直径 50μ の電氣的特性の等しい 2本の白金線を 60° の角度で向かい合わせて, 同一平面内にある 3本の黄銅製支持棒の先端にハンダ付けして張つたものである.

計測装置の電気回路構成図およびホイートストブリッジ回路図を夫々第13および14の両図に示す. 2つの熱線はホイートストブリッジの2辺に組み込まれており, 乱れが無いとき回路は平衡状態に保たれるが, 熱線を含む平面内で流れの方向が変化すると, それに応じて回路の平衡が破れ出力電圧を生ずる. これを増幅して直記式電磁オシログラフに導いて波形を記録する. 第15, 16図はプロー



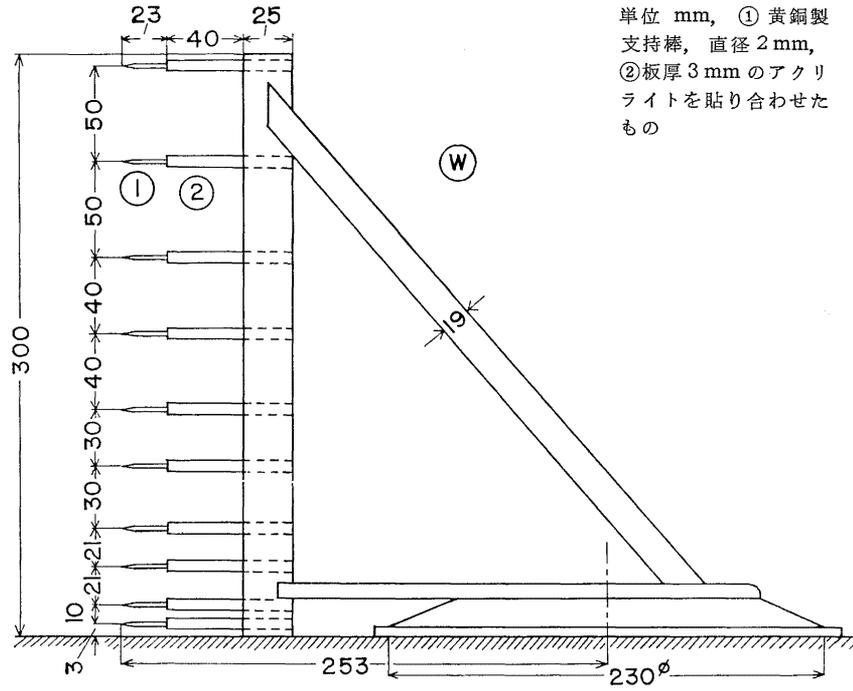
①ホイートストンブリッジ, ②プローブ (直径50 μ 白金線), ③可変抵抗器 (20 Ω , 2k Ω 並列), ④直流増幅器, ⑤直記式電磁オシログラフ, ⑥直流低電圧安定電源装置, ⑦交流発電機 (60 cycle/sec, 100 V, 10 A)

第 13 図 電気回路の構成

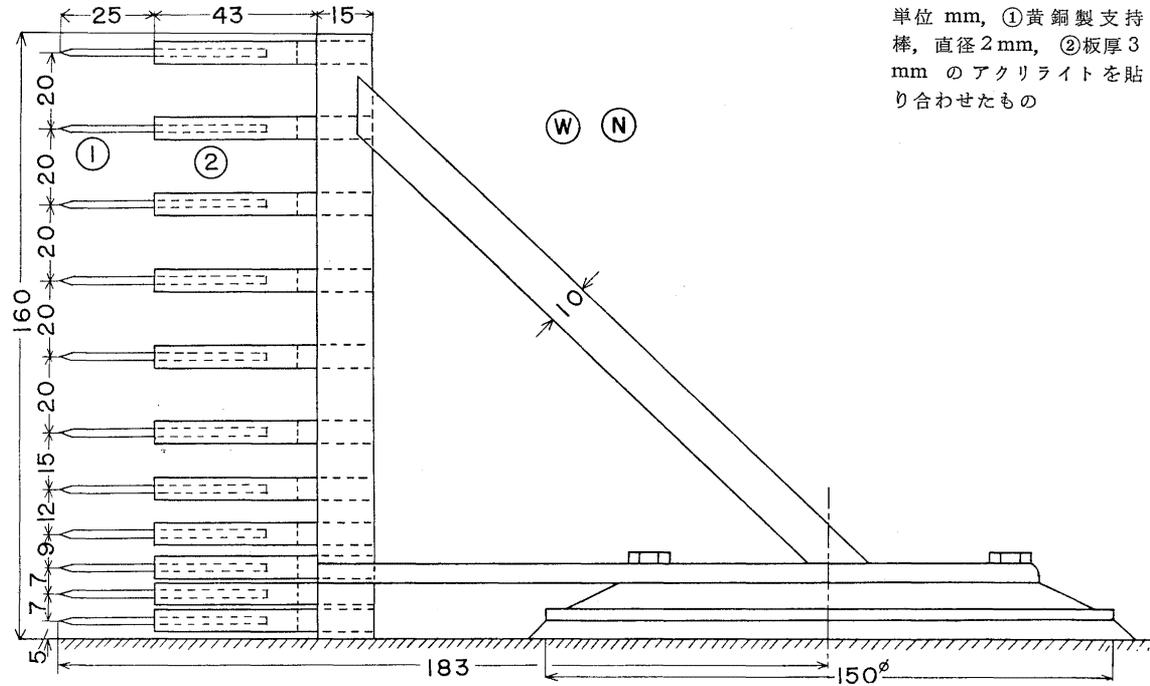


①プローブ (第 1 報写真 15 参照), ②白金線 (直径 50 μ , 長さ 7 mm), ③入力 (直流電源より), ④出力 (直流増幅器へ)

第 14 図 ホイートストンブリッジ回路



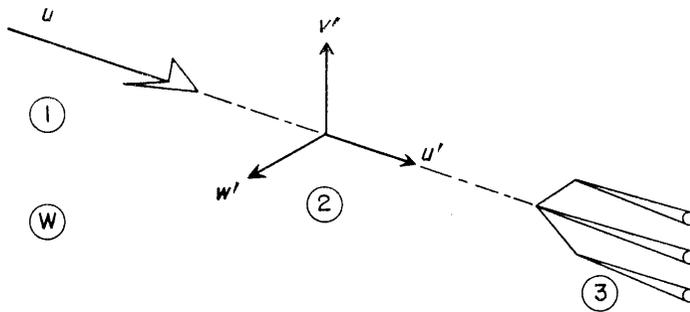
第 15 図 大型吸盤に取り付けられた熱線流速計セット (側面図)



第16図 小型吸盤に取り付けられた熱線流速計セット (側面図)

ブを船体へ取り付けるための吸盤装置を描いたものである。即ち1回の走行によつて y 軸上の多くの点で測定が同時にできるように、上述のプロープ10本(または11本)を1組にまとめ、しかも2本の熱線を含む面を互いに平行に保つて、図に示すような間隔で支柱に固定した、大、小2つのセットを用意し、これを夫々前述の大小の吸盤によつて船体壁面に取り付ける。なお今回の計測では記録装置のチャンネル数の都合で10本(または11本)のプロープのうち、最高6本までが同時に使用された。

次にこの熱線流速計による乱れの測定について述べる。第17図で、 u は主流の速度、 u' は主流方向の乱れの成分、 v' は船体壁面に平行で主流に垂直な成分、 w' は船体表面に垂直な成分とする。上述の測定装置は、各プロープの支柱が船体表面に垂直で、2本の熱線を含む面は船体表面に平行な面内にあり、且つ2本の熱線のなす角の2等分線の方向が主流の方向と一致するように取り付けられたので、熱線はその対称性によつて、主流 u および乱れの u' 、 w' 成分には感ぜず、従つて今回の測定では、 v' 成分、即ち船体表面に平行で主流に直角な方向の乱れの成分、だけが検出されたことになる。しかし将来は乱れの強さ、速度相関、エネルギースペクトル、等についても測定を行なう予定である。



第17図 熱線流速計による乱れの測定法
①主流, ②乱れ, ③熱線プロープ

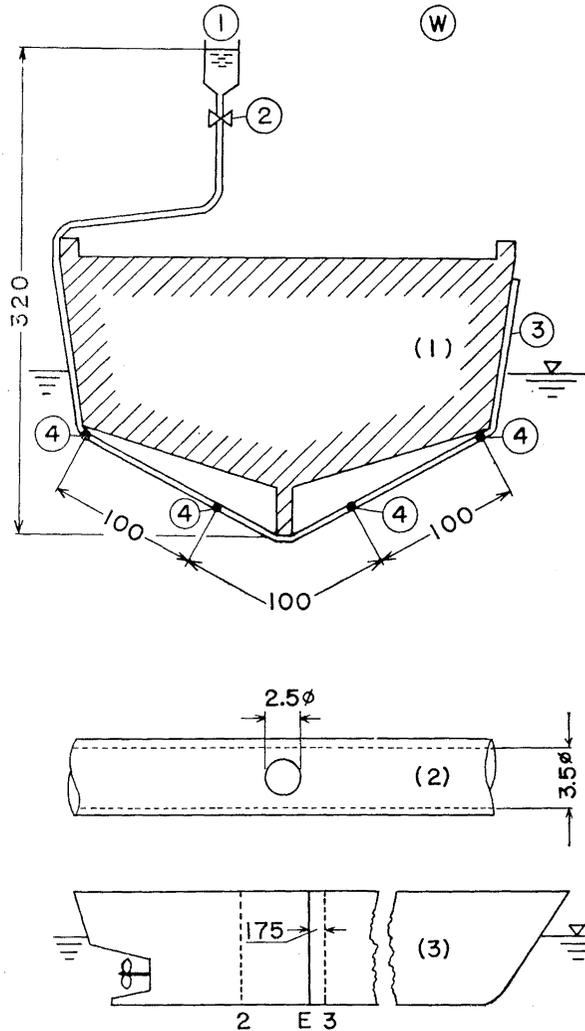
写真12は直記式電磁オシログラフ、ホイートストンブリッジ抵抗箱、直流電源装置、13, 14は夫々大型、小型の吸盤に装着された乱れ測定用プロープセット、最後に15は乱れ測定用プロープの先端(実物の約3倍)である。

[3.4] 後流の visualization

剥離流を含む後流の flow pattern を visualize するための染料として、フルオレセイン fluorescein $C_{20}H_{12}O_5$ の苛性ソーダ添加水溶液を用いた。²⁾ これをキャビンの上方に設けたタンクに貯えておき、適宜コックを開いて、船体の E ステーションに巻き付けて固定された内径 3.5 mm の銅パイプ中に導

1) ここで主流というのは、1点における平均速度である。即ち x, y, z 方向の速度は $u+u', v', w'$ で与えられる。通常の記号では u は \bar{u} または U と書かれるけれども、今は簡単のため本文のように記した。この記号は第2報でも用いられる。

2) コンデンスミルクおよび石灰水なども試用したが失敗であった。



(1) 一般配置図, 単位 cm, ①フルオレsein液容器 (容量 10 lit), ②コック, ③銅パイプ, ④色素水噴き出し孔位置

(2) 銅パイプと色素水噴き出し孔との詳細, 単位 mm

(3) パイプ取り付け位置 (E), 単位 mm, 2, 3 はステーション番号, 第 5 図参照

第 18 図 後流 visualization 装置

き,¹⁾ 4ヶ所の小孔 (直径 2.5 mm) から海水中に噴き出す。噴き出されたフルオレsein液は鮮明な緑色を呈する。装置全体の配置および各部の詳細は第 18 図として描かれている。色素によつて海水中に描き出された流れの pattern は肉眼で観察すると同時に、35 ミリカメラニコン F (超広角レンズ f 21 mm, F4 付き) および 8 ミリシネカメラで撮影された。写真 16 は後流の visualization に使用された銅パイプの 1 部分を示す。

1) 第 5 図参照。

§ 4 実船計測の結果と考察

本節には前節で説明した装置と方式とによつて計測された速度プロファイル、乱れの強さ、および後流の visualization の各項目毎に、得られた結果と、それに対する若干の考察とを、この順序で述べる。ただし実験に先立ち 1 日を費やして実船上で実施された吸盤の性能テストについてその前に一言することとしよう。

[4.1] 吸盤の性能試験（実船）

実験室で行なわれた吸盤の性能試験については § 2 に詳しく述べたが、これを以て必ずしも直ちに実船に装着した時の性能を示すものと判断することができないのは勿論である。そこで我々としては慎重を期するために、吸盤を実際の船体に吸着し船を相当時間航行させることによつて、その性能をテストした。¹⁾ 第 4 表に示すのは、流速測定用圧力管セットを装着した吸盤の海上での性能テストの成績である。乱れ測定用吸盤は水の漏れる所があつて吸着しなかつたので（これは直ちに修理して本実験の際には充分使用できた）、吸盤を手で支えて固定し、流れの抵抗を受ける白金線の強度テストだけを行ない、その結果 50 μ の白金線が充分の強さを持つことを知つた。かくてこのテストの結果、我々の試作した吸盤およびその附属装置は、少なくともこの程度の大きさや速度との船に対しては充分その目的を達し得ることが実証された。²⁾

第 4 表 吸盤性能テストの結果

番号	吸盤の種類	吸着位置	船速 (m/sec)	テスト 継続時間 (min)	結果
1	流速測定用小型吸盤（直径 15 cm）	船側 4½ ステーション	4	5	異常なし
2	同上	船底 4½ ステーション ³⁾	4	3	同上
3	流速測定用大型吸盤（直径 23 cm）	船側 4½ ステーション	3	5	同上

（吸盤内外の圧力差は 710~720 mmHg であつた）

[4.2] 速度プロファイルの計測

船体表面上の 1 点でそれに立てられた外向き法線を y 方向と呼ぶことにする。ただし y=0 は船体表面にとる。y 軸上の各点で総圧と静圧とを計測すれば、夫々の点における平均流速を算出し、従つて

1) 事態がこのように進んだので、我々は“わかすぎ”実験の直前からアクアラングによる潜水技術を習得することを開始した。これは辰野正和および深町信尊両実験員が担当した。この後に行なわれた“南星丸”実験においては、アクアラング方式を充分に活用したけれども、“わかすぎ”実験では準備不足のため、潜水作業は専ら“すもぐり”で行なわれた。

2) なお安全を期するために、吸盤には船体との間に必ず頑丈な安全ワイヤを付けて万一に備えた。“わかすぎ”実験では幸いにしてこのワイヤは役に立つ機会がなかつたけれども、後日の“南星丸”実験の際には外れた吸盤をこのワイヤが繋ぎ止めるという事態を経験した。

3) 保護パイプの浸水長が 1 の場合より長くなり、従つてその抵抗もまた大きくなる。即ち 1 よりも苛酷な条件で作動することになる。

速度プロファイルを見出すことは容易である。しかし境界層内部の静圧は y 軸に沿つてほぼ一定と仮定されるのが普通であるから、我々の圧力管セットでも、その1番外側の1本だけで静圧を併せ計測することにした。即ち静圧を測定するのは大型吸盤の場合 $y \approx 30$ cm, 小型吸盤の場合 $y \approx 16$ cm の1本だけで、その内側にはその静圧がそのまま浸透しているものと仮定する。しかし一般に曲面に沿う2次元境界層に対しては次の関係式が成り立つ。¹⁾

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho \kappa u^2, \quad (4.1)$$

ここに p は静圧, ρ は水の密度, κ は壁面の曲率, u は平均流速である。即ち y 軸上で境界層外縁と壁面上との圧力の差は $\rho \delta \kappa u^2$ の程度である。ただし δ は境界層の厚さ, u_1 は境界層外縁 ($y = \delta$) 上の u の値である。即ち p が境界層内部で y に沿つて到るところ一定であるという仮定の相対誤差は $\delta \kappa$ の程度であると考えられる。 κ が船体上の各点で異なることは勿論ながら、今そのごく大まかな目安として、船の長さ L の逆数をとれば、 $\delta \kappa$ は δ/L の程度となる。そこで $\delta = 20$ cm, $L = 12$ m とおけば $\delta/L = 1/60$, 従つて上の仮定に伴う誤差が高々数パーセントに止まることはほぼ確実である。

次に考慮すべきことは圧力管セット取り付け方向の問題である。船体周りのポテンシャル流線の方向を正確に知ろうとする試みは種々あるけれども、²⁾ 何れも相当量の計算を必要とする。境界層の内部にはこれに加えて所謂 secondary flow の現象が起こつて、 y 軸に沿つて流れの方向は漸次変化し、必ずしもポテンシャル流れの方向と一致しない。このような2重の困難が圧力管の方向を決定するのにつきまとうことになる。³⁾ この点に関しては我々の実験グループの内でも、流れの方向を測定できる多孔ピトー管を使用する案が出たのであるけれども、今回の“わかすぎ”実験に際しては、圧力管の方向を単純に船の進行方向とほぼ一致させるという簡便法を採用した。このために導入された誤差がどの程度に達するかを正確に見積もることは不可能であるけれども、PANKHURST および GREGORY によれば、⁴⁾ ピトー管の読みは横振れ yaw に対して極めて鈍感で、薄肉ピトー管で 20° の角変位が動圧の読みに与える影響は0.5%以下であることが述べられていることに注意すれば、圧力管取り付け方向に基づく誤差も高々数パーセントに止まるであろうと思われる。

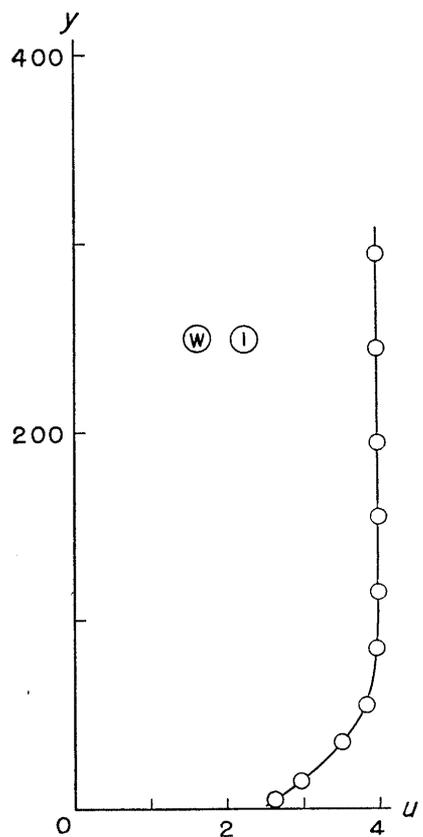
第19図(1)乃至(7)に船体表面の各点 (§ 3, [3.1], 特に第5図参照)で計測された速度プロファイルを示す。ただしこれらの全体を通じて白丸 ○ および黒丸 ● は夫々大型および小型の圧力管セットによる測定結果に対応する。(1)は A_1 点の速度プロファイルを無次元化することなく生のまま示したものであつて、壁面から測つて $y = 11$ cm 乃至 12 cm のところで縦方向の流速 u が最大値 u_{max} を持ち、その外側では速度が一様流速(船の対水速度) U に向かつて漸次減少してゆくものを見ることが

1) GOLDSTEIN, S., *Modern Developments in Fluid Dynamics*, vol. I, IV, 45, eq. (8), p. 120. 本来ならば3次元境界層に対して議論すべきであるが、ここでは曲率の影響の程度を見積もるのが目的であるので、簡単のため2次元の場合について記した。

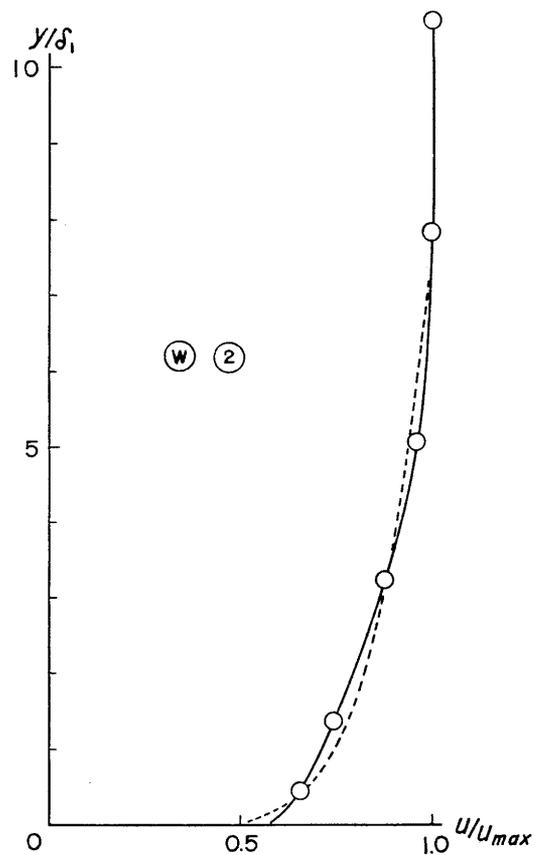
2) この点について石川島播磨造船所神中竜雄氏より次の資料の恵与を忝くした。ここに記して謝意を表す。神中竜雄, 船の流線の新計算法と secondary flow について (未発表)。

3) 船体が pitching などの運動を行なうと、更に流れの非定常性による誤差が起こってくる。

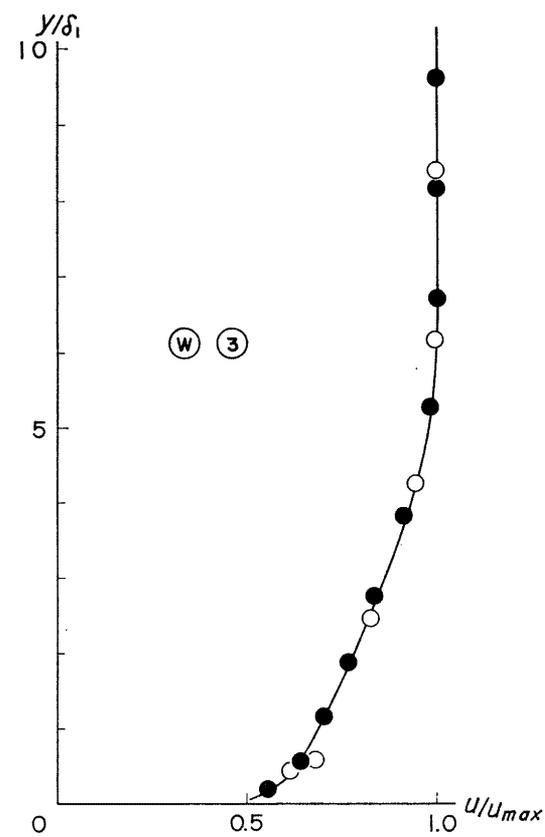
4) ROSENHEAD, L. (ed.), *Laminar Boundary Layers* (1963), Oxford at the Clarendon Press, X, Experimental Methods, p. 593 以下。



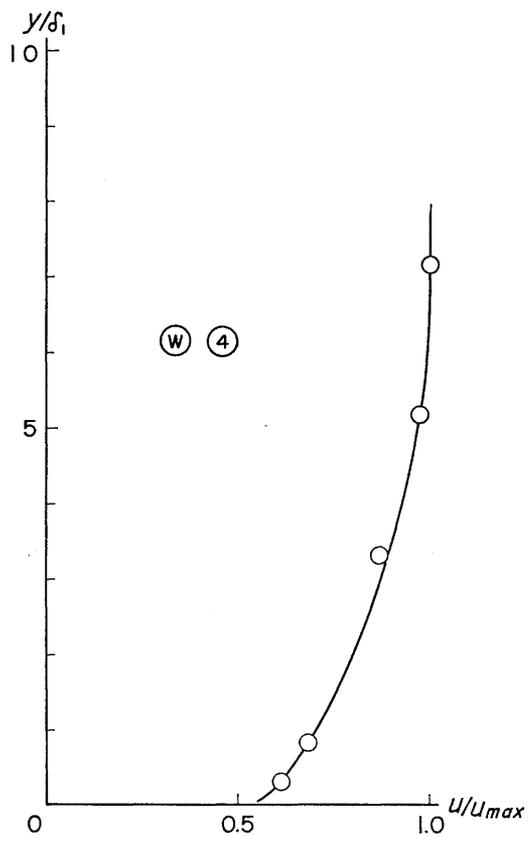
第19図 速度プロファイル (1)
測定点 A_1 (u は m/sec, y は mm)



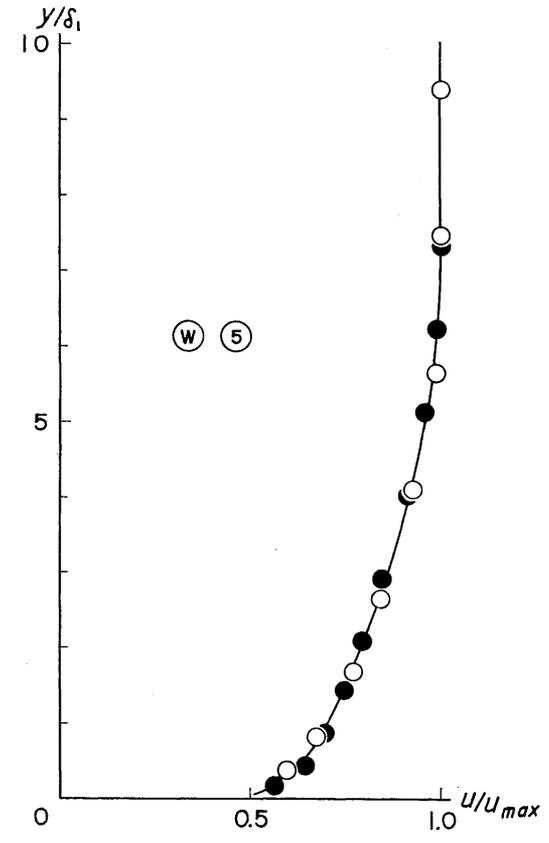
第19図 速度プロファイル (2)
測定点 A_1 (点線は $1/7$ 乗法則)



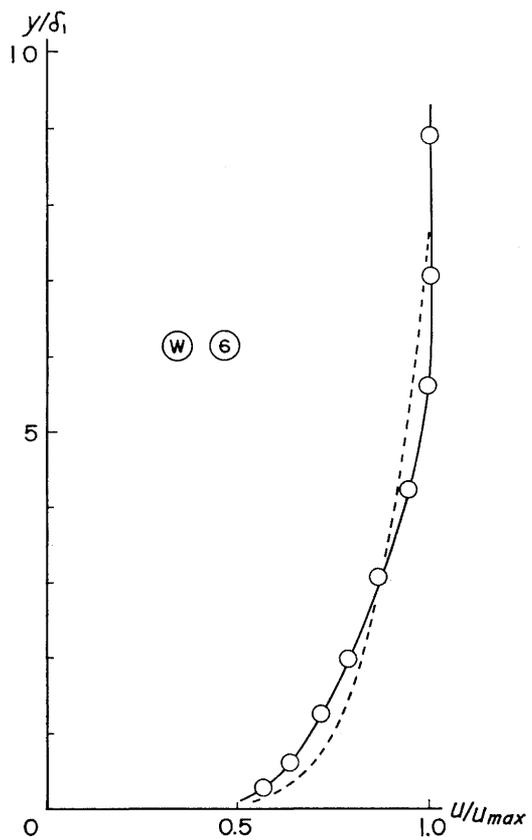
第19図 速度プロファイル (3)
測定点 A_2



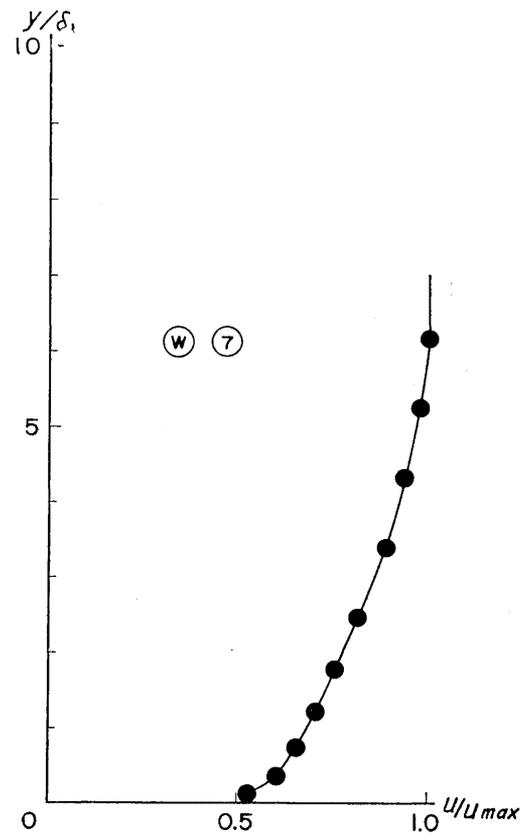
第19図 速度プロファイル(4)
測定点 B₁



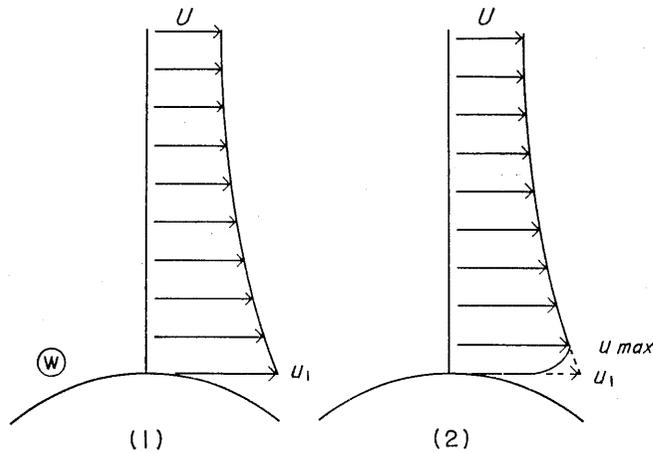
第19図 速度プロファイル(5)
測定点 C₁



第19図 速度プロファイル(6)
測定点 D_1 (点線は $1/7$ 乗法則)



第19図 速度プロファイル(7)
測定点 D_2



第 20 図 境界層厚さの決定
(1) はポテンシャル流れ, (2) は境界層の流れ

できる。凸の曲面に沿うポテンシャル流れは、第 20 図 (1) のように、壁面に近づくにつれて無限遠の速度 U から漸次増えて壁面で最大値 u_1 を取ることになるが、実際には同図 (2) のようにポテンシャル流れは外部に僅かだけ押しやられて、壁面との隙間に所謂境界層流れが発達することになる。第 19 図 (1) は境界層からポテンシャル流れへの典型的な推移を示している。勿論第 20 図 (2) に示すように u_{max} が u_1 と若干の相違を示すことは当然ながら、何分境界層の厚さが代表長さ（ここでは船の長さ）に比べて充分小さいので、その厚さの中でのポテンシャル流速の変化は殆ど無視してよい。即ち u_{max} と u_1 とはほぼ相等しく、両者は所謂境界層外縁の流速に等しいと見なして差し支えないであろう。従つて便宜的に、 u が u_{max} となる点を以て境界層の外縁と定義する。ただしこの定義にはグラフの読みとり際に際してなお若干の曖昧さが含まれるので、次のようにして排除厚 δ_1 を計算すれば實際上それを取り除くことができる。

$$\delta_1 = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{u_{max}} \right) dy. \quad (4.2)$$

ここに δ は $u = u_{max}$ となる点の y の値であつて、この積分の値はプランメーターを用いて計算した。第 5 表はそのようにして求められた δ_1 の値である。第 19 図 (2) 乃至 (7) では速度および距離を夫々 u/u_{max} , y/δ_1 という無次元形で示した。またそのうち (3) および (5), 即ち A_2 および C_1 点の測定では、同一点で大型吸盤を取り替えて速度プロファイルの再現性を立証した。これによつて我々の計器が概ね計画通り作動していること、および圧力管の横振れ yaw の問題がさほど致命的でないことなどが間接的に証明されたものと考えられる。¹⁾ また第 19 図を見ての感じでは、海面状況およびそれによる船の動揺等の影響は速度プロファイルの測定結果に殆ど現われていないようである。これは圧力

1) A_2 点, 第 19 図 (3), で大型吸盤が測定したプロファイルの底部に不自然な個所が目立つのは、吸着作業中圧力管が曲がつたため y の値が狂つたものと想像される。

第5表 境界層の厚さ

測定位置	u_{max} (m/sec)	δ (mm)	δ' (mm)	δ_1 (mm)	
A ₁ (大)	3.99	110	88.0	10.8	
A ₂	(小)	4.10	95	87.5	13.8
	(大)	3.87	100	88.5	13.4
B ₁ (大)	3.98	100	97.6	15.6	
C ₁	(小)	3.92	130	110.4	18.1
	(大)	3.87	130	110.7	20.7
D ₁ (大)	3.90	160	116.7	27.6	
D ₂ (小)	3.94	135	116.4	21.5	

管とマンメーターとの組み合わせによる計測方式では短い周期の変化が平均されてしまうことによるのであろう。

第5表に示したのは速度プロフィルの実測曲線から $u/u_{max} \approx 1$ に対応する y の値として読みとられた境界層の厚さ δ mm と、船体の曲率を無視して流れに平行に置かれた平板と見なして 1/7 乗法則によつて計算された相当平板の境界層厚さ δ' mm とを比較して、その両者に大差がないことを示すためのものである。その他に u_{max} m/sec および (4.2) を用いて実測速度プロフィルより計算された排除厚 δ_1 mm をも併せ記入した。ただし δ' の計算は次の公式による。¹⁾

$$\delta' = 0.37 \left(\frac{u_1 x}{\nu} \right)^{-1/5} x. \quad (4.3)$$

ここで $\nu = 0.92 \times 10^{-6}$ m²/sec, x は船首垂線 F.P. から測つた水平距離, u_1 は平板の前進速度に対応するものであるが、ここでは各例につきその点の u_{max} をとり、この値が板の先端から後端まで一様に拡がっているものとみなす。²⁾ A₁(大), C₁(小) 等の略号の意味は § 3, [3.1], 頁 22 を参照していただきたい。

[4.3] 乱れの測定

各々の測定点で記録された乱れの波形を写真 17 乃至 20 に示す。どの測定点をとつても、船体壁面近くでは比較的振幅の大きく周波数の低い乱れが記録され、その外側には殆ど乱れの存在しない領域が認められる。大雑把に平均流の速度プロフィルから判断して、これら 2 種類の流れの存在領域は、境界層の内部とその外側のポテンシャル流れの領域とはほぼ対応していることが分かる。乱れの存在する層の厚さ δ'' (その外縁の y 座標) は第6表に示される。

一般に熱線プローブの乱れに対する感度は平均流の速度によつて変わる (平均流速が小さい程感度が

1) GOLDSTEIN, S., 前出, vol. II, VIII, 163, eq. (65), p. 362.

2) 船の前進速度をとればもつと合理的であつたと思われるが、今回の実験では船速を正確に測定することが出来なかつた。なお第6表 (頁 42) 脚註 1 参照。

第 6 表 乱れの存在範囲

測定位置	船速 (m/sec) ¹⁾	プローブ位置 y (mm)	乱れの存在する層の 厚さ δ'' (mm)
A ₁ (小)	3.96	5, 12, 19, 28, 40, 55	$55 < \delta''$
A ₂ (小)	3.53	5, 12, 19, 55	$55 < \delta''$
A ₂ (大)	3.23	3, 34, 85, 155, 245	$34 < \delta'' < 85$
B ₁ (小)	3.20	5, 12, 19, 28, 40, 55	$55 < \delta''$
C ₂ (小)	3.40	5, 12, 19, 28, 40, 55	$55 < \delta''$
C ₂ (大)	2.70	3, 34, 85, 155, 245	$85 < \delta'' < 155$

よい) ことを考慮に入れなければならないが, この実験では平均流の速度は 2 乃至 4 m/sec の範囲に限られるから, 熱線流速計の特性から考えて, 少なくとも定性的な議論にはそのための補正は不必要と思われる. また乱れの測定を行なった時の海面の状況は § 3, [3.1] に述べたように所々に白波が立つ程度であった. 海面の波浪による乱れの影響が存在すれば, それは境界層の内外を問わず各測定点の乱れの記録に様に影響し, 波の周期と船速とに依存するような周期的な乱れの群が記録されるはずである. 写真 17 乃至 20 に掲げられた記録によると, 境界層の外側の測定記録には電気回路に帰因するとと思われるノイズ以外の明確な周期的乱れは存在しない. 従つて今回の乱れの測定におよぼす海面波浪の影響は極めて小さく, 測定記録の解析に際しては無視しても差し支えないものと思われる.

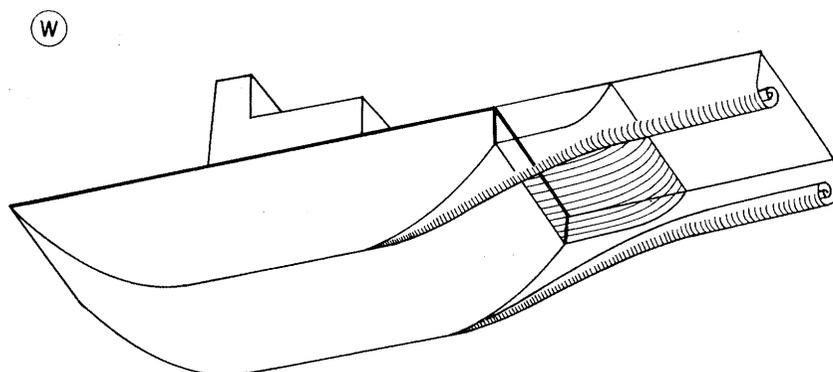
[4.4] 後流の visualization

船体後流にできる渦の構造については, 先に種子田および天本が模型実験の結果を報告したが,²⁾ これに対応して実船の後流渦を観察することを試みた. 実船の場合は小型ガラス水槽での模型実験と異なり, 理想的な照明ができないこと, 撮影者の位置が狭い範囲に制限されること, 海面の波立ち, 海面による空の反射, 等々のために甚だしく困難である. 更に今回の実験では, 染料の吐き出し方法が不完全であったこと (タンクが片側だけにあつたこと, 染料を導くパイプの径が小さかつたこと等による), またフルオレセイン自体が海水と同系統の色 (グリーン) であつたこと, 等の欠点为重なる鮮明な記録を得ることができなかつた.³⁾ しかし肉眼による観察および 8 ミリシネカメラによるカラーフィルムから次の事実を認めた. (1) 直進時色素の流れ (流脈) は殆ど平行に船体表面に沿つて後方へ延び, そのままかなり後方まで平行を保つ. (2) 船底の両方のかどから流れ出る色素はよじれて渦糸状を呈し, 第 21 図のような 3 次元剥離渦の存在を示す. (3) 船が旋回を始めると船体の両側から発生していた剥離渦は消えて, 内側船側から斜めに離れる 1 本の渦糸が現われる. (4) 船体後方には狭い死水領域の存在が認

1) 第 6 表の船速は, 船尾からあきピンに紐をつけて海中に投げ込んで紐の伸びから測つたもので, 後流の影響を受けてあまり正確ではない.

2) 種子田定俊, 天本肇, 船の剥離渦 (I), 応用力学研究所所報, 第 27 号 (1967), pp. 1-15.

3) (追記) “南星丸” 実験に際しては, フルオレセイン以外のいろいろな色素を試用した. その結果から見ると, やはり今のところフルオレセインが最も成績良好のように思われる.



第21図 船 の 剝 離 渦

められる。

以上の結果は REYNOLDS 数が甚だしく異なるにも拘らず、小型水槽による上記模型実験の結果と完全に一致している。このことは REYNOLDS 数 10^7 程度の実船の乱流運動が同じく 10^8 程度の模型船の層流運動に定性的に対応することを示すものである。我々は更にこの実験の1ヶ月後に行なわれた“南星丸”実験 (REYNOLDS 数 10^8 程度) に際しても同様のことを確かめることができた。

§ 5 む す び

九州大学応用力学研究所において文部省特殊研究費の援助を得て行なわれている“実船における境界層の計測”に関する研究は、§ 1 に詳しく述べたように、船体表面上に作られる3次元的な乱流境界層の特性を実用船舶について計測しようとするものである。勿論最終的には、多様な船型と航行状態とに対して、また出来るならば種々の気象条件の下で境界層を測定し、船舶流体力学の基礎資料とすることを目指しているのであるが、当面予定された研究期間 (昭和41乃至43年度) 内には差し当たり、種々の大きさの実用船舶に対して適用可能な計測方法と計測装置との開発を第1の目標とする。

昭和41年度内に繰り返された数多くの討論と、実験室での種々の予備テストとを経て、我々は計測計画に対して一応の成案を得たのであるが、試作された計測装置を直ちに実用船舶に応用する前に、運動性が良好で、しかも速度が自由に変えられる小型船舶に取り付けて、海上テストを実行することを必要と考えた。“わかすぎ”の実験はこのようにして企図され、この目的に沿うように実施された。

昭和42年6月19日より21日まで福岡県宗像郡津屋崎町の沖合で実施されたテストの結果はほぼ満足すべきものであり、吸盤、速度計測用圧力管、マンメーター、熱線流速計、flow visualization 用装置等は大体において期待された性能を発揮した。勿論実験室とはすべての状況が大いに異なる海上で使用することによつて、様々の弱点を露呈した部分も数多くあつたけれども、それを発見することもまたこの実験の大きな目的であつたので、欠陥に対しては早急に改良または変更を加えた。それらの改良点はここに述べるよりも、むしろこの実験の約1ヶ月後に行なわれた鹿児島大学水産学部漁業実習船“南星丸”による計測 (第2報) に関連して説明する方が便利であろうと思われるので、ここでは一切省略

することにしよう。

以上によつて明らかなように, “わかすぎ” 実験によつて得られた流体力学的な知見はすべて未確定であり, 暫定的であるといわねばならぬ。その当否を確認することはもつと多くの船型で, 多様な航行状態の下に, しかも遙かに多くの測定点で計測を実行した後始めて可能になるであろう。そのような保留を附して若干気の付いた点を列挙すると次のようである。

先ず速度プロファイル計測から明らかとなつた点: (1) 境界層の厚さは船を平板と見做して見積もつたものと大差がないようである。今後の実験に対しても, 境界層の厚さの程度を予想するにはこのような簡略算を用いて大過ないであろう。(2) 曲率, secondary flow 等の影響があるので甚だ複雑な問題ではあるけれども, 第 19 図に示された速度分布を (1) の知見に従つて平板に沿う境界層のそれと看れば, 速度プロファイルは普通に仮定されている所謂 $1/7$ 乗法則よりはむしろ $1/6$ 乃至 $1/5$ 乗の方によつて, より正しく近似されるように思われる。¹⁾

次に乱れの測定から結論される諸点: (3) 層流底層を除いて, 一般に乱れの強さは船体表面に近い程, また船尾に近い程大きい。(4) 強い乱れの存在する層の厚さは, 速度プロファイルから定義される境界層の厚さとほぼ一致する。

最後に後流の visualization から: (5) 直進する船の剝離流は船のうしろに長くのびる 2 本の螺旋状の渦からなる。(6) 旋回中の船の剝離流は, 船尾近くの内側船側から斜めに離れて 1 本の渦糸を形成する。(7) 船体後方には死水領域が形成される。以上。

なお (5), (6) および (7) の諸項目が嘗て種子田および天本の実施した小型水槽による模型実験の結果 (応用力学研究所所報, 第 27 号) と完全に一致していることは特に注目すべきものと思われる。

小文を終わるに際し, 我々は応用力学研究所流体力学, 水文学, および流体工学の各部門所属研究補助員諸君の協力と労苦とに心から感謝する。即ち深町信尊君は吸盤および流速分布測定用諸装置の設計製作に従事し, なお実測に当たつては最も困難な潜水作業を行なつた。石井幸治君は熱線流速計の設計製作, および主として乱れの測定を担当した。若林大三君は実験全般の補助に任じた。その他星野スマ子, 柳瀬仁美, 沢井テルヨ, および伊藤益美の諸君は実験員を扶けて, 作業全体を円滑に進行させるのに与かつて遺憾なかつた。この研究は, 上記 3 部門より成る流体研究部全員が協力して 1 つの目標に進むという方針に基づいて計画されており, 実験が一応満足すべき成果をあげたのは, この報告の著者として名を連ねた研究担当者その他, 上記諸君の協力のたまものである。ここに再記して謝意を表する。

(昭和 43 年 1 月 8 日 受理)

1) なお GOLDSTEIN, S., 前出, vol. II, XI, 226, TABLE 17, p. 516 を参照。

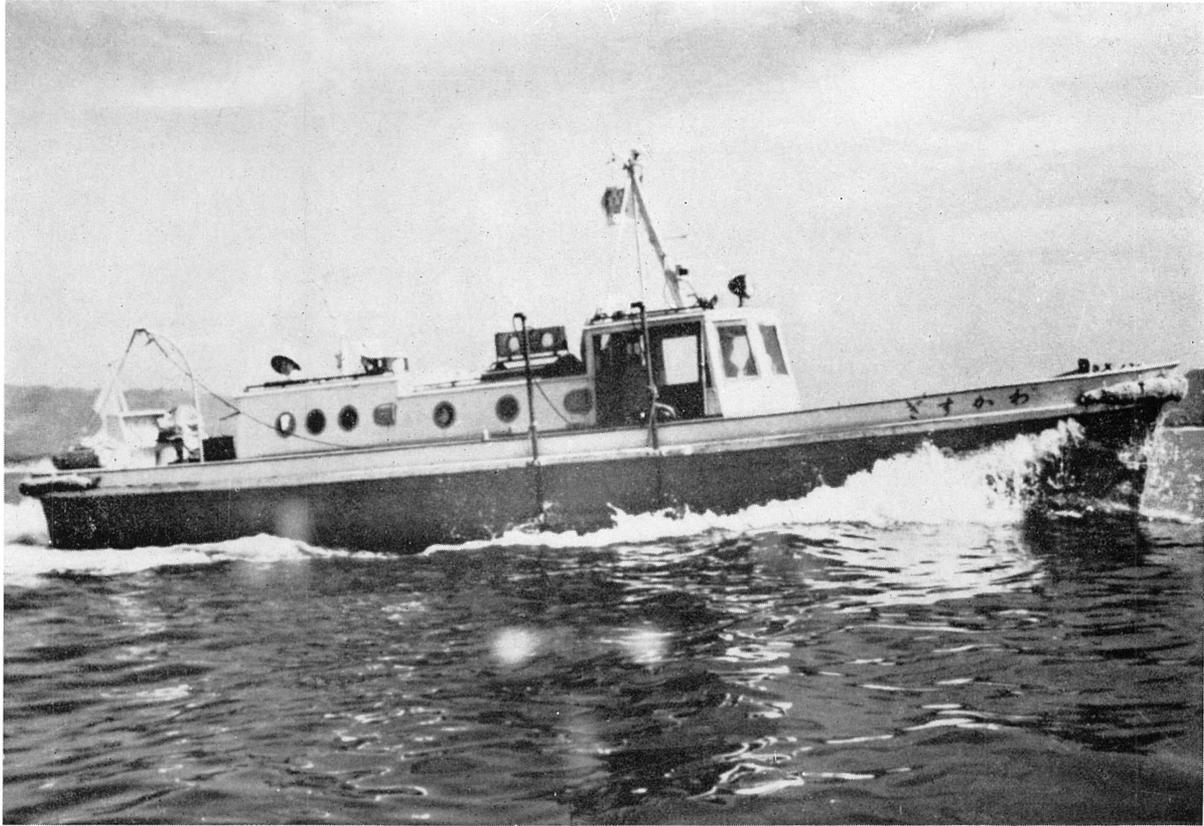


写真1 わかすぎ (水産実験所撮影)



写真2 わ か す 船 (津屋崎港にて)



写真3 吸盤とりつけ作業

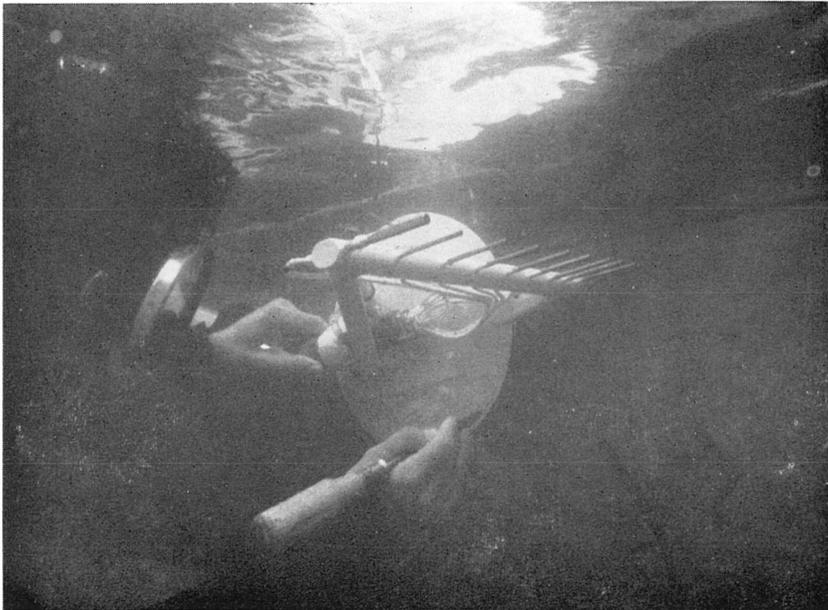


写真4 吸盤とりつけ作業（船側）

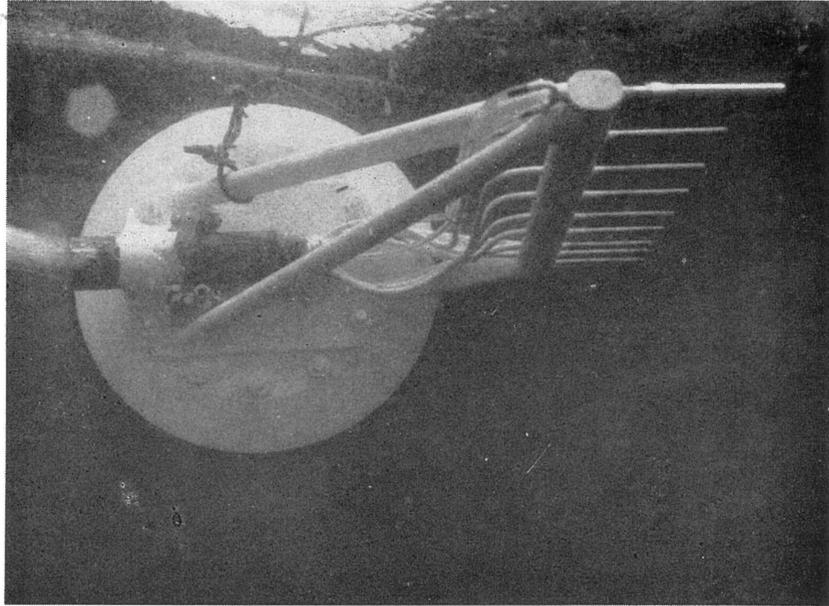


写真 5 船側に取り付けられた流速測定用圧力管セット

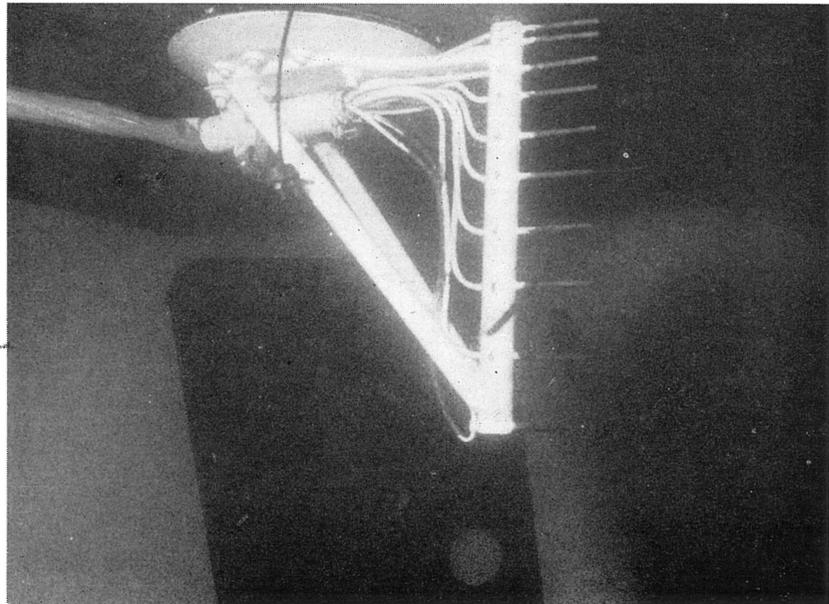


写真 6 船底に取り付けられた流速測定用圧力管セット

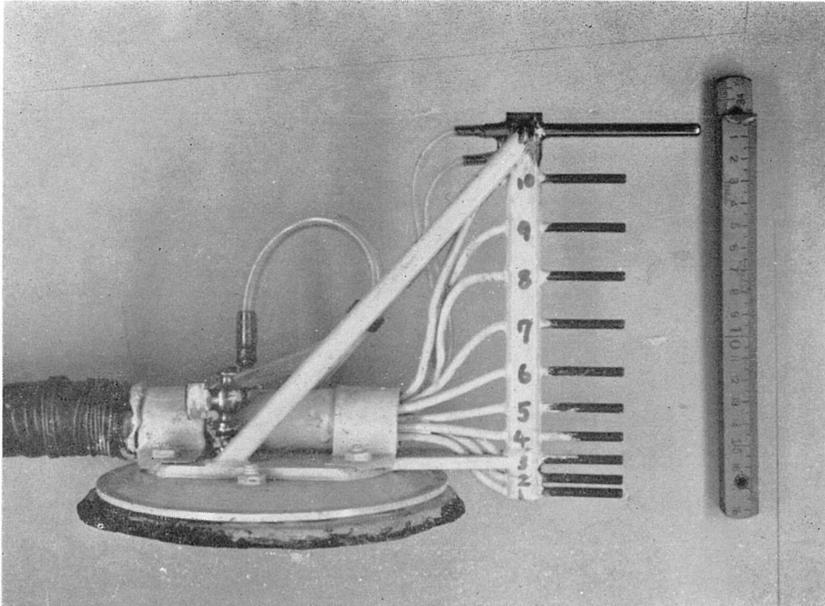


写真7 小型吸盤（直径 15 cm）に装着された流速測定用圧力管セット

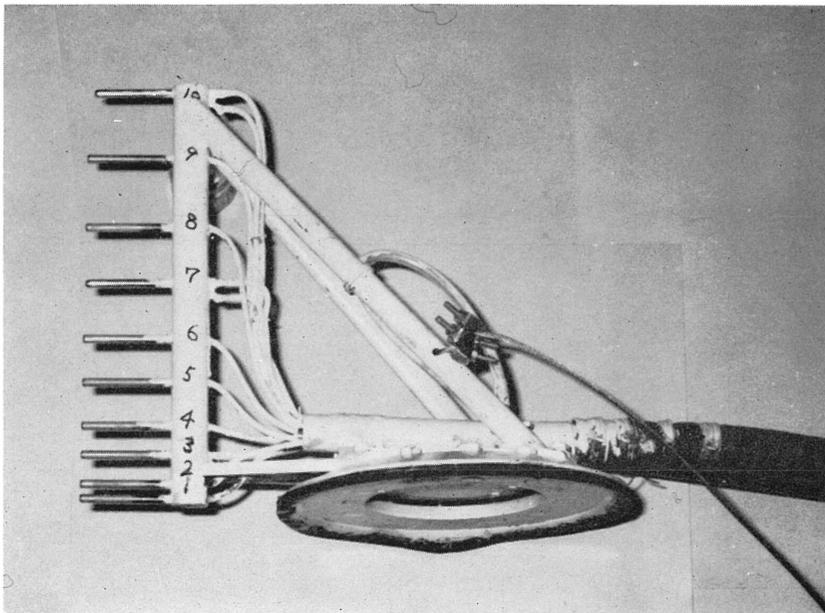


写真8 大型吸盤（直径 23 cm）に装着された流速測定用圧力管セット

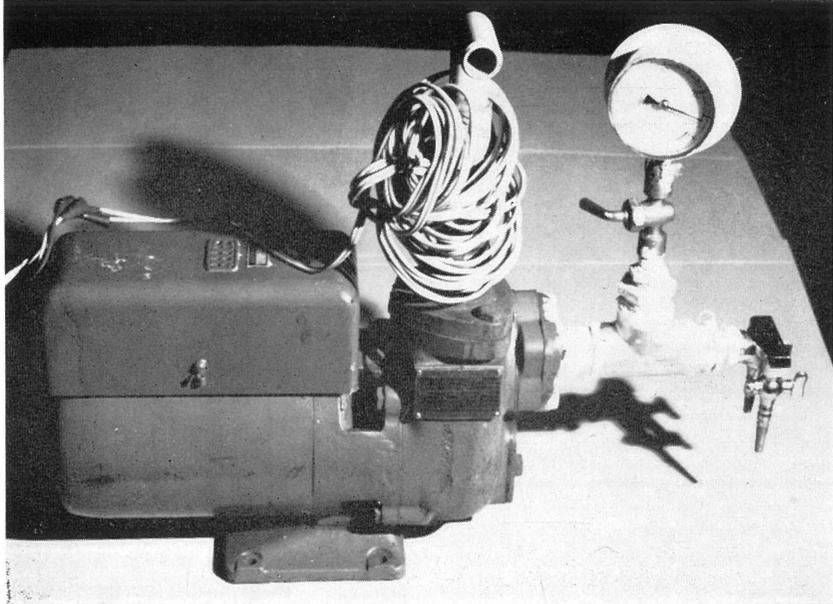


写真9 排水ポンプ(吸盤用)

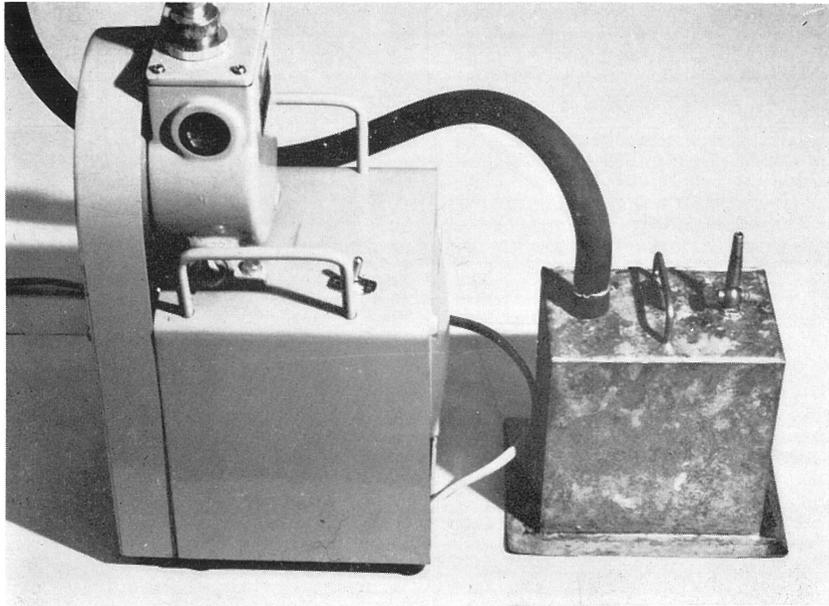


写真10 左真空ポンプ, 右真空チャンバー(何れもマンメーター用)

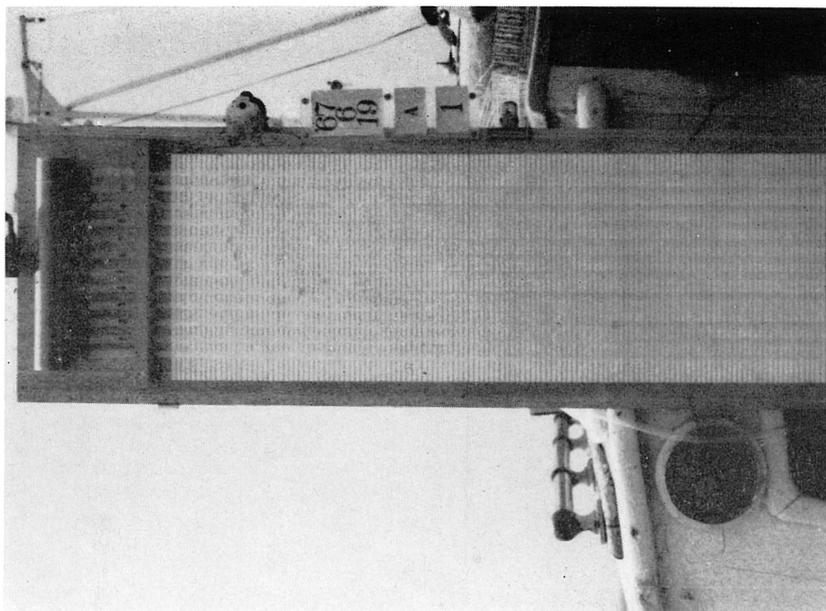


写真11 マノメーター装置（上部）

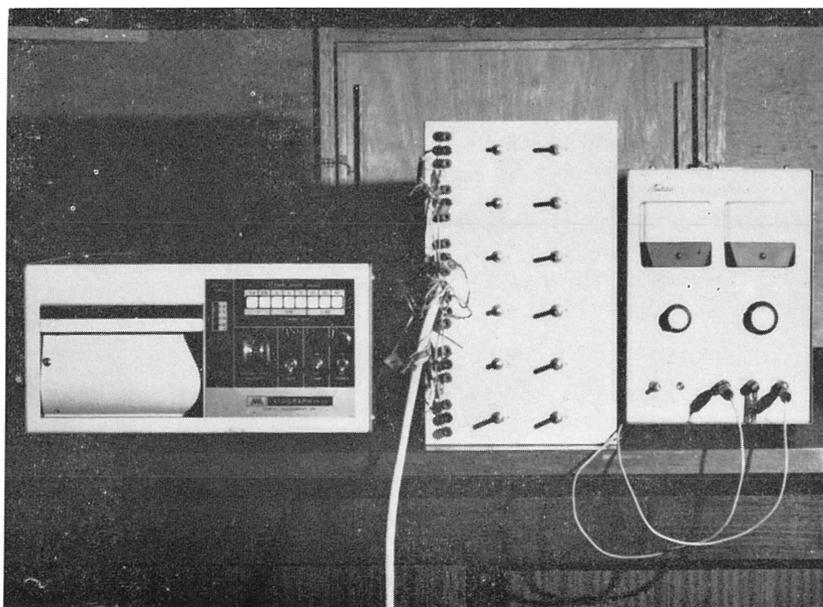


写真12 左より直記式電磁オシログラフ，ホイートストンブリッジ抵抗箱，および直流電源装置

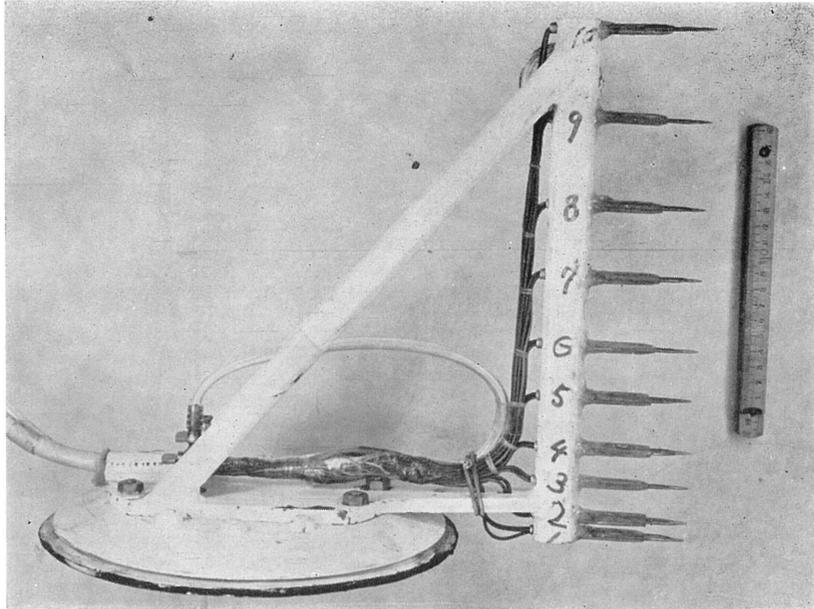


写真13 大型吸盤に装着された乱れ測定用プローブセット

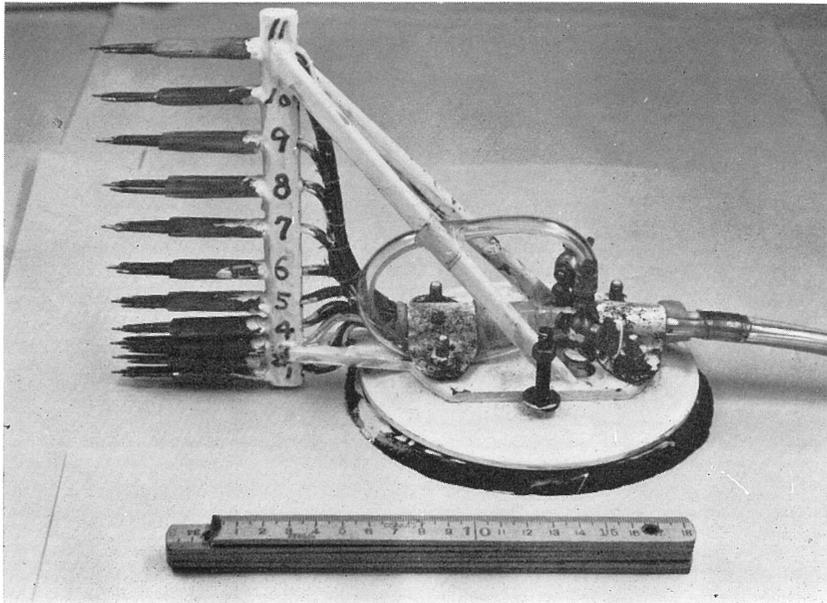


写真14 小型吸盤に装着された乱れ測定用プローブセット

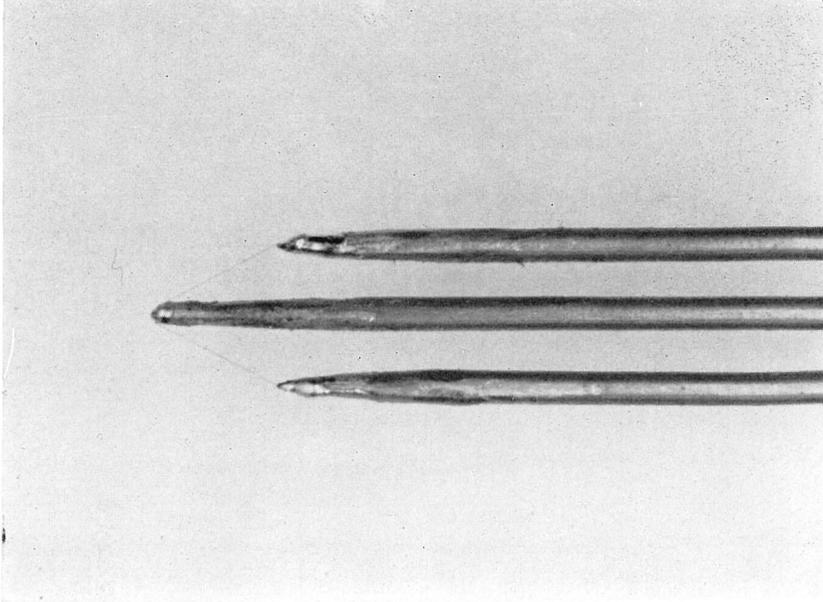


写真15 乱れ測定用プローブの先端(×3)

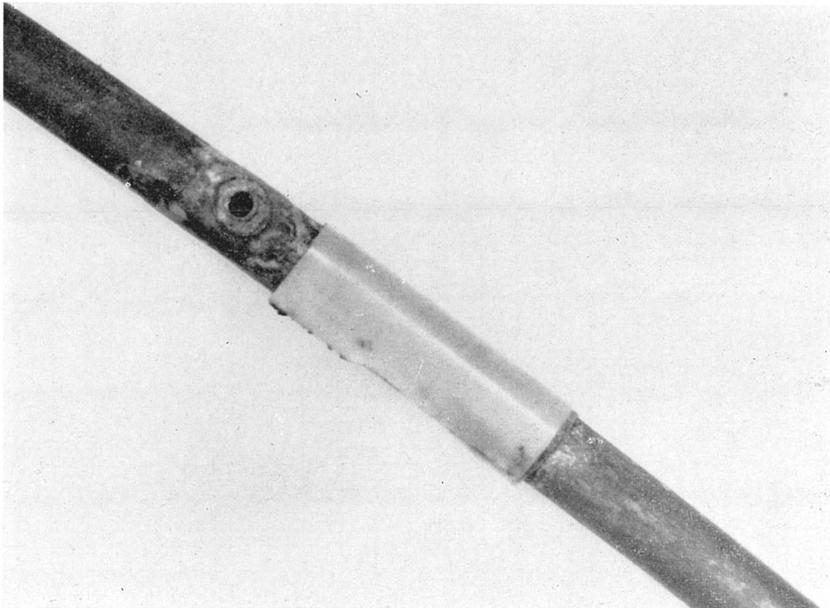


写真16 後流 visualization 用銅パイプ (部分), 左上の孔が色素水噴出用孔

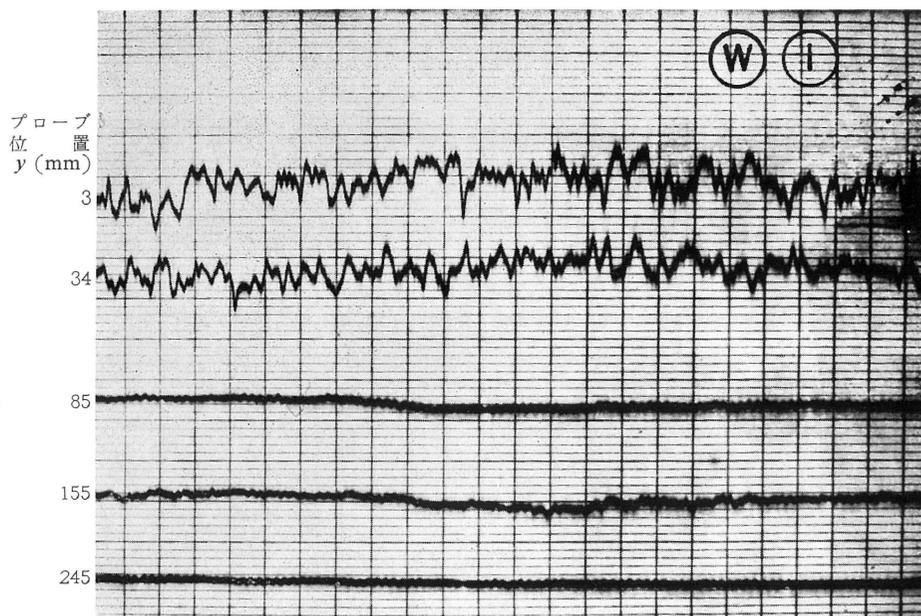


写真17 乱れのデータ(1)

測定位置 A_2 , 船速 3.23 m/sec, 縦線の刻みは 0.1 sec. (第6表参照)

写真18 乱れのデータ(2)

測定位置 B_1 , 船速 3.20 m/sec, 縦線の刻みは 0.1 sec. (第6表参照)

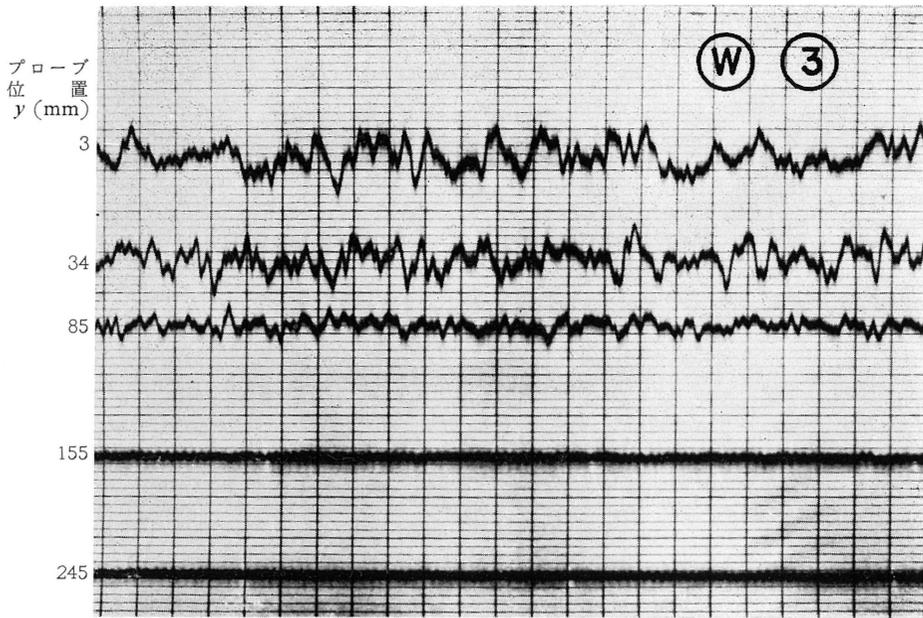


写真19 乱れのデータ(3)

測定位置 C_2 , 船速 2.70 m/sec, 縦線の刻みは 0.1 sec. (第6表参照)

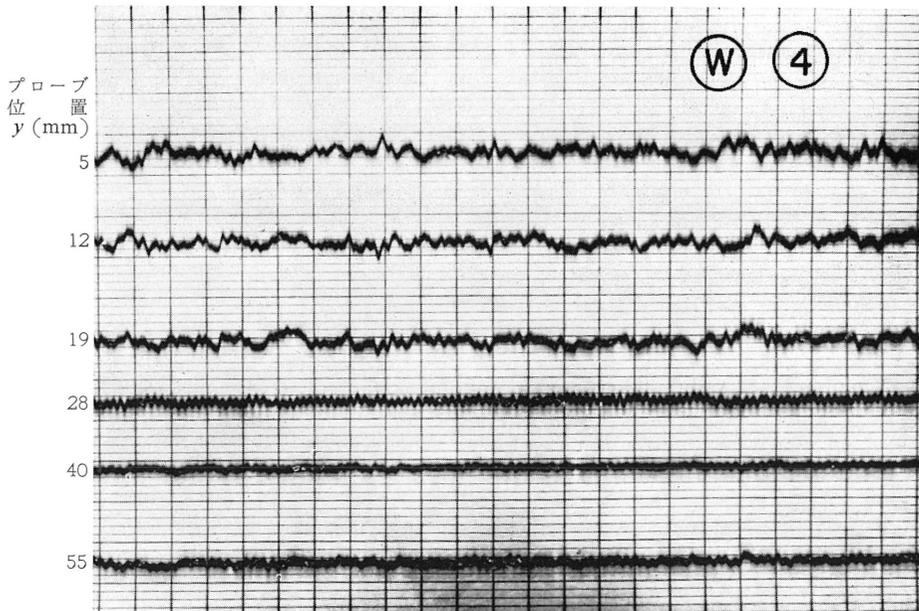


写真20 乱れのデータ(4)

測定位置 C_2 , 船速 3.40 m/sec, 縦線の刻みは 0.1 sec. (第6表参照)

Measurements of Boundary Layers of Ships
The First Report—"Wakasugi" Tests

By

Toyoji KUMAI (Professor), Jun-ichi OKABE (Professor),
Fukuzo TASAI (Professor), Sadatoshi TANEDA (Professor),
Masaki TAKEMATSU (Lecturer), Susumu INOUE (Assistant),
Masakazu TATSUNO (Assistant), Hiroyuki HONJI (Assistant),
Hajime AMAMOTO (Assistant), and Iwao YAMASHITA (Assistant)

Abstract

In Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, a research group was organized, supported by the Grant-in-Aid for the Special Scientific Research from Ministry of Education over a three-year period from 1966 through 1968, in order to conduct a series of experimental investigations entitled "Measurements of Boundary Layers of Ships", of which the following is the first, preliminary report. (In the followings, as the "boundary layer," we mean the "turbulent boundary layer in three dimensions" unless otherwise mentioned.)

In § 1, it is stated that because of the very limited term to be devoted to this research project, we have to confine our present objective to a rather small field of study connected directly with developments of the technique and the equipment suitable for measurements of boundary layers of full-scale ships, although of course the purpose of this research as a whole should lie ultimately in contributing to the progress of naval hydrodynamics by furnishing it with those fundamental data in relation to characteristics of boundary layers formed on ship hulls, which might be collected only by measuring various quantities significant in boundary layer research for a great number of ship forms as well as of navigation conditions. Furthermore, it is added that in order to obtain by ship measurements experimental data of boundary layers detailed and reliable satisfactorily from a standpoint of modern hydrodynamics, we had to invent some new technique of attaching instruments to a ship hull without injuring it, instead of an experimentation in which a pitot tube is protruded through the hull (see e.g. BAKER, G. S., and PROHASKA, C. W., *Trans. North-East Coast Inst. Engineers and Shipbuilders*, vol. 46 (1930), and vol. 78 (1962), respectively). Desirably our new installation should be such that it might be displaced quite easily from one position to another on a wetted surface, so that measurements at a number of points can be practised without so much difficulty. With a view to solving this problem, the report continues, the sucking-disks specially designed for our purpose were manufactured tentatively.

This section is concluded by a short mention of the so-called flow visualization applied to a real ship wake. This project, initiated in connection with another research program, entitled "Systematic Studies of Flow Visualizations", to be brought into practice in Research Institute for Applied Mechanics over the period 1967-1969 supported by the Grant-in-Aid for the Institutional Research from Ministry of Education, aims, as a small part of the whole project, at clarifying by a visual method hydrodynamic structure of ship wake including that of separated flow downstream of boundary layer.

In § 2, the detail of the sucking-disk above-mentioned is explained. Also it is outlined that the satisfactory result was achieved through the performance test of the disk carried out in the laboratory.

Descriptions of the test boat and of the measurement equipments are found next in

§ 3. The boat put to use in the experiment is the *Wakasugi*, a wooden launch engaged in fishery investigations, belonging to Fishery Experimental Station of Faculty of Agriculture, Kyushu University, whose important particulars are as follows: length overall 11.655 m, length by the rule 11.5 m, breadth 3 m, depth 1.3 m, gross tonnage 9.5 t, main drive being a Diesel engine of 45 bhp, and designed maximum speed 8.5 kt (about 4.4 m/sec). The essential part of the test was performed during June 19th through 21st, 1967, in the sea area off the coast of Tsuyazaki Machi, Munakata Gun, Fukuoka Ken.

The objectives of our boundary layer measurements were confined to (1) the velocity profile, (2) the intensity of turbulence, and (3) the visualization of the wake. For the experiment (1) the sets of pressure tubes and the manometers were prepared, and the hot-wire anemometers for the experiment (2). A sucking-disk was equipped with a set of pressure-tubes or that of hot-wire probes, and through attaching it (the larger one being 23 cm in diameter, while the smaller, 15 cm) to the hull by a diver, we were enabled to make measurements at an arbitrary location on the wetted surface. With regard to the experiment (3), on the other hand, it was planned to elucidate structure of the wake by observing the motion of the colored water ejected into the sea out of four orifices bored on a copper pipe wound round the boat, through which water solution of fluorescein $C_{20}H_{12}O_5$ was made run.

In § 4, results are summarized of these three kinds of measurements. Namely, the sucking-disks, both large and small, behaved excellently by sticking fast to the surface and making all the schemed measurements successful. The pressure-tube sets, the manometers, as well as the hot-wire anemometers showed altogether fine performances. The velocity profile in the boundary layer was measured at six points on the hull; the result was expressed in a non-dimensional form u/u_{max} vs. y/δ_1 , where y denotes the distance along the normal on the surface, δ_1 the displacement thickness of the boundary layer, u the component of velocity in the longitudinal direction (namely, the direction to the length of a ship along its hull), and u_{max} being the maximum value of u on the axis of y ; practically therefore u_{max} may be regarded as the velocity of the stream on the outer edge of the boundary layer. Incidentally, at two points among six, a large disk (equipped with a large pressure-tube set) was exchanged for a small one (equipped with a small set) at the same point in order to verify the reproducibility of our velocity measurements. Out of the turbulence measurements by means of the hot-wire anemometer, on the other hand, we may conclude as follows: turbulence in the region adjacent to the hull has a large amplitude and a low frequency, however as soon as we enter the field of potential flow, turbulence dies out completely. Finally by virtue of observations through visualization of the ship wake, existence of two vortices, separated from the boat sides, extending downstream indefinitely with the general flow and rotating in spiral forms (in opposite directions to each other), and formation of dead water region right behind the stern were both established.

The paper comes to an end in § 5: by stating briefly that the new techniques invented by us yielded tolerably satisfactory results in the "Wakasugi" tests, it is pointed out that the purpose of the present experiment, undertaken as a preliminary work toward the development of navigation measurements of full-scale ship boundary layers, was fulfilled to a certain degree, and that besides miscellaneous faults in parts of measurement apparatus discovered in the course of this trial provided us with invaluable data for the preparation of the next experiment, practised as a matter of fact after forty days using the *Nansei Maru* (45 tons), a fishing training ship of Faculty of Fisheries, Kagoshima University (the details will be published as the second report before long).

It was not necessarily expected from the beginning of the trials, therefore, to arrive at definite answers in problems of boundary layers of ships, and in fact the scope of our present measurements, both in quantity and in quality, does not justify us in drawing conclusions with full confidence. However, bearing these reserves in mind, the items listed

below may be regarded as temporary conclusions from a point of view of hydrodynamics connected with full-sized ship boundary layers and ship wakes. (1) The thickness of the boundary layer formed on the surface of a hull makes no great difference between the value worked out from the formula of the boundary layer of two dimensions along a flat plate of an infinite breadth, neglecting the curvature of the hull altogether. (2) The velocity profile may be approximated by the function $y^{1/5}$ or $y^{1/6}$ better than $y^{1/7}$, the so-called 1/7-th power law. (3) The intensity of turbulence in the boundary layer becomes larger, as we go nearer to the hull or to the stern. (4) The thickness of the region in which intense turbulence is found to subsist may be considered as the same approximately as that of the boundary layer defined through measurements of velocity profiles. (5) The flow separated from the boat running straight consists from two vortices rotating in spiral forms. (6) The separated vortex from a turning boat flows out obliquely apart from its inner side in the neighborhood of the stern. And finally, (7) the dead water domain is formed just behind the boat. Incidentally, it should be remarked that (5), (6), and (7) are completely coincident with the results derived from the model experiment in a small water tank performed a few years ago by TANEDA and AMAMOTO (*Bulletin of Research Institute for Applied Mechanics*, no. 27, 1967).

A full paper written in English covering the contents of the first and the second report together with the forthcoming experiments to be made in 1968 will be published after the whole project is completed.

Figures and photographs

- FIGURE 1 (page 18) Large sucking-disk
 FIGURE 2 (page 18) Small sucking-disk
 FIGURE 3 (page 18) Sucking-disk (forces acting upon it)
 FIGURE 4 (page 19) Testing installation of a sucking-disk (schematic figure)
 FIGURE 5 (page 23) Lines of "Wakasugi" (also indicating positions of measurements)
- FIGURE 6 (page 25) Large pressure-tube set (side view)
 FIGURE 7 (page 26) Small pressure-tube set (side view)
 FIGURE 8 (page 27) Large pressure-tube set (top view)
 FIGURE 9 (page 27) Small pressure-tube set (top view)
 FIGURE 10 (page 28) Small pressure-tube set (bird's-eye view)
 FIGURE 11 (page 28) Vacuum chamber (bird's-eye view)
 FIGURE 12 (page 29) Measurement of velocity (schematic figure)
 FIGURE 13 (page 30) Measurement of turbulence (block diagram)
 FIGURE 14 (page 30) Measurement of turbulence (bridge circuit)
 FIGURE 15 (page 31) Large turbulence-detecting probe set (side view)
 FIGURE 16 (page 32) Small turbulence-detecting probe set (side view)
 FIGURE 17 (page 33) Measurement of turbulence (theoretical background)
 FIGURE 18 (page 34) Equipments for wake visualization
 FIGURE 19 (page 37-39) Velocity profiles in boundary layer (1)-(7)
 FIGURE 20 (page 40) Boundary layer thickness (determination)
 FIGURE 21 (page 43) Vortices separated from ship (hydrodynamical constitution)
- PHOTOGRAPH 1 (page 45) *Wakasugi* (courtesy of Fishery Experimental Station, Kyushu University)
 PHOTOGRAPH 2 (page 46) *Wakasugi* (in Tsuyazaki harbor)

- PHOTOGRAPH 3 (page 47) Attachment of a sucking-disk
- PHOTOGRAPH 4 (page 47) Attachment of a sucking-disk (boat side underwater)
- PHOTOGRAPH 5 (page 48) Pressure-tube set (attached to boat side)
- PHOTOGRAPH 6 (page 48) Pressure-tube set (attached to bottom)
- PHOTOGRAPH 7 (page 49) Large sucking-disk (equipped with large pressure-tube set)
- PHOTOGRAPH 8 (page 49) Small sucking-disk (equipped with small pressure-tube set)
- PHOTOGRAPH 9 (page 50) Drain pump (for a sucking-disk)
- PHOTOGRAPH 10 (page 50) Vacuum pump and vacuum chamber for manometers
(from left to right)
- PHOTOGRAPH 11 (page 51) Manometers (upper portion)
- PHOTOGRAPH 12 (page 51) Direct-recording oscillograph, Wheatstone's bridges, and
d-c power supply (from left to right)
- PHOTOGRAPH 13 (page 52) Large sucking-disk (equipped with large turbulence-de-
tecting probe set)
- PHOTOGRAPH 14 (page 52) Small sucking-disk (equipped with small turbulence-de-
tecting probe set)
- PHOTOGRAPH 15 (page 53) Tip of a turbulence-detecting probe (magnified)
- PHOTOGRAPH 16 (page 53) Part of copper pipe for ship wake visualization (showing
an orifice)
- PHOTOGRAPH 17 (page 54) Data of turbulence (1)
- PHOTOGRAPH 18 (page 54) Data of turbulence (2)
- PHOTOGRAPH 19 (page 55) Data of turbulence (3)
- PHOTOGRAPH 20 (page 55) Data of turbulence (4)

正 誤 表 (追加)

実船における境界層の計測 (第1報)
九州大学農学部水産調査艇“わかすぎ”による計測について
熊井豊二 他9名
応用力学研究所所報 第28号 (昭和42年)

頁	訂正箇所	誤	正
59	PHOTOGRAPH 7	Large sucking-disk (... large ...)	Small sucking-disk (... small ...)
59	PHOTOGRAPH 8	Small sucking-disk (... small ...)	Large sucking-disk (... large ...)