

船の剥離渦 : II

種子田, 定俊

天本, 肇

<https://doi.org/10.15017/4743451>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 29, pp.41-60, 1968. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



船 の 剥 離 渦 (Ⅱ)

種子田 定 俊
天 本 肇

概 要

小型模型船および実船の船体から発生する剥離渦をフロービジュアリゼーションにより観測した。一般に直進時には船首および船尾の船底彎曲部付近で3次元剥離が起こり、そこから主流方向に軸を持つ渦糸が後方へ長くのびている。船尾付近にはこの他に死水を伴う剥離が独立に存在する場合が多い。斜航する場合には一定の角度以上では直進時の剥離渦が消えて、内側船側より1本の3次元剥離渦が後方へ流れ出る。スクリュープロペラの回転に基づく流れも渦糸を形成して後方に長く尾を曳くが、船体からの剥離渦とは一般に無関係である。死水を伴わない3次元剥離渦はReynolds数にほとんど無関係であるが、死水を伴う剥離の方はReynolds数に敏感である。模型船と実船の流れとを比較した結果、Reynolds数 10^8 付近の実船の流れはReynolds数 10^{3-4} の模型船の流れに酷似していることが明らかとなった。

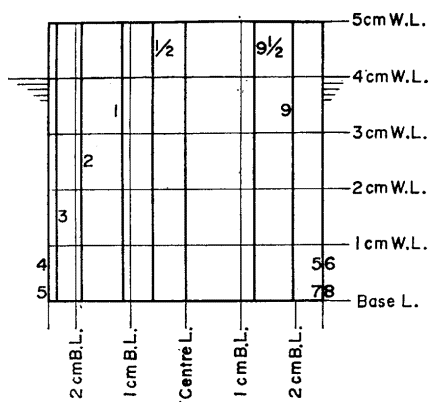
§ 1 緒 言

船の剥離渦は最近多くの人々の関心を集め、優れた研究成果^{1)~5)}が次々と発表されているがまだ不明の点が多い。前報⁶⁾において述べたごとく、一般に直進する船の船底彎曲部付近からは主流方向に軸を持つ多数の3次元剥離渦が発生して後方へ吐き出され、ほとんど平行して後方に長く尾を曳いている。渦糸の発生位置、数、回転方向は船形により色々に変化する。今回は斜航時に剥離渦がどのように現われるか、スクリュープロペラを回転させた時の剥離渦の変化、プロペラ後流と船体剥離渦の干涉、死水域の大きさとReynolds数の関係、3次元剥離渦とReynolds数の関係、実船の流れと模型船の流れの対応等について種々のフロービジュアリゼーションの方法を用いて実験を行なった。

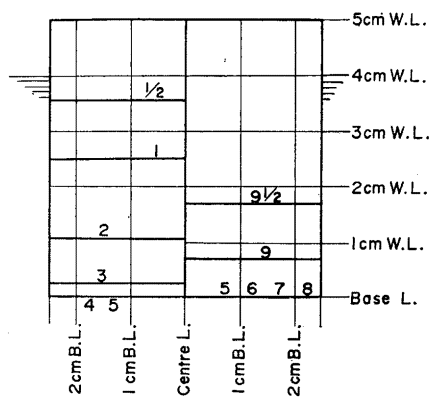
§ 2 実験装置と方法

模型船実験は長さ200cm、幅40cm、深さ40cmの小型ガラス張水槽で行なわれた。模型船の長さはすべて約25cmであり、模型船曳引車の速度は1.3~100mm/sの範囲を連続的に変化させることができる。模型船は前報で使用した4種類のほかに新たに南星丸およびかごしま丸の模型を加えて6種類を使用した。南星丸(総トン数44.56トン、最大速力9.8ノット)は昨年夏鹿児島大学と共同で実船観測を行なった鹿児島大学水産学部漁業練習船であり、かごしま丸(総トン数1,038トン、最大速力15.5ノット)は本年秋に同じく鹿児島大学と共同観測を行なう予定になっている鹿児島大学水産学部の練習船である。第1~6図に模型船の正面線図を示す。流れを可視化するために、模型船の色々の場所にコンデンスミルクおよびフルオレセイン(緑色)、ローダミンB(赤色)で着色されたコンデンスミルクを塗りつけ

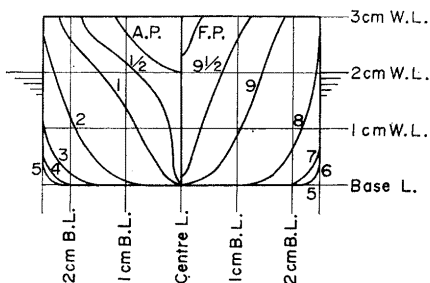
て曳航し、後方へ流れ出る色素の模様をカラー写真で撮影した。この方法により、色々の色素のからみ合いから流れの詳しい模様を知ることができた。



第 1 図 R型模型船正面線図

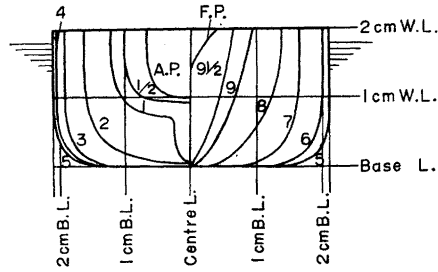


第 2 図 S型模型船正面線図

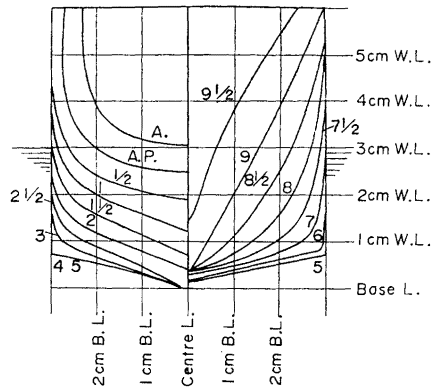


第 3 図 貨物船 A 模型船正面線図

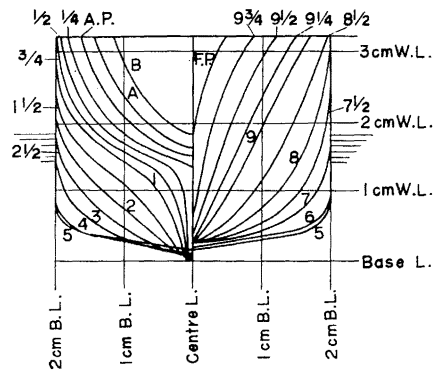
なお、実船観測^{7),8)}ではフルオレseinナトリウムおよびローダミンBを船体に巻きつけたパイプを通して海水中に注入することにより良好な結果を得た。



第 4 図 戦艦M模型船正面線図



第 5 図 南星丸模型船正面線図

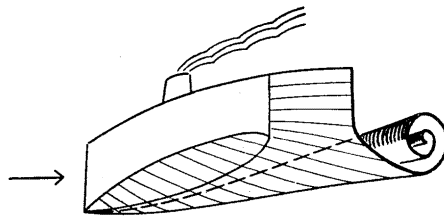


第 6 図 かごしま丸模型船正面線図

§3 実験結果

(3-1) 斜航する場合の剝離渦

船が斜航または施回する場合には、剝離渦は直進時とはなはだしく異なる形をとる。直進する場合には船首および船尾の船底彎曲部から3次元渦糸が発生して後方へ流れ出し、後方に行くほどわずかに間隔を拡げながらほとんど平行して長くのびている。そして渦糸の回転方向は前報で述べたごとく、船形により異なる。斜航する場合も主流と船体の角度が小さい時には剝離渦の現われ方にほとんど変化が生じないが、次第に角度を増大していくと船体内側に新しく大きな3次元剝離渦が急激に発達しはじめ、直進時に存在した渦糸は見えなくなってしまう。注目すべきことはこの内側に新しく発達する渦糸の回転方向が船形に無関係にすべての船に対して同じであることである。すなわち、船首が主流に対して右に傾いている場合には後方から見て反時計回りであり、左に傾いている場合には時計の針と同じ方向に回転する。これは丁度船全体が一つの翼であり、船と主流の角度を迎角と考えた時の有限翼の翼端渦に一致する。翼理論でよく知られているように、この翼端渦の強さは翼の受ける揚力に比例する。船が斜航する場合にも船は横力を受け、その横力に比例する渦糸が船体から流れ出しているわけである。つまり、直進時の3次元剝離渦が船体表面の彎曲部の局所的曲率によって局所的に発生するのに反し、斜航時の3次元剝離渦は局所的曲率には無関係に船全体の姿勢によって全体的に発生するものである。写真1～14は色々な模型船が斜航する場合の剝離渦をコンデンスミルク法で撮影したものである。また、第7図は船首が右に傾いている場合を例にとって、剝離渦の現われ方を図解したものである。

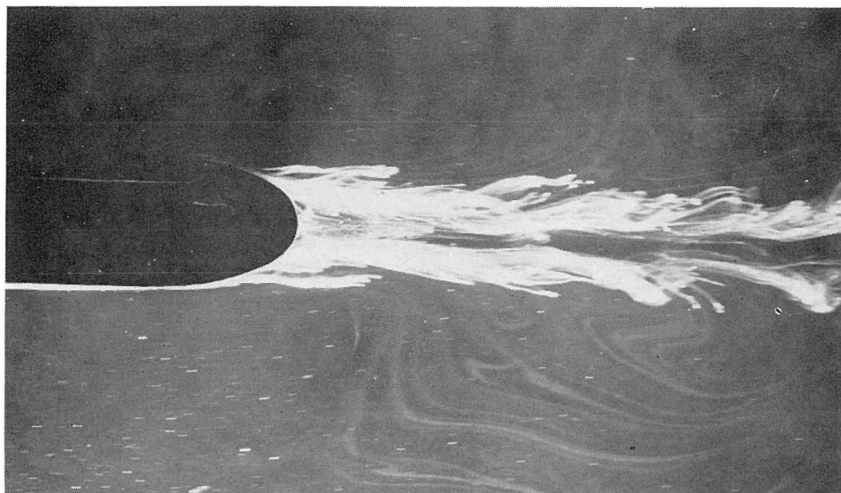


第7図 斜航する船の剝離渦

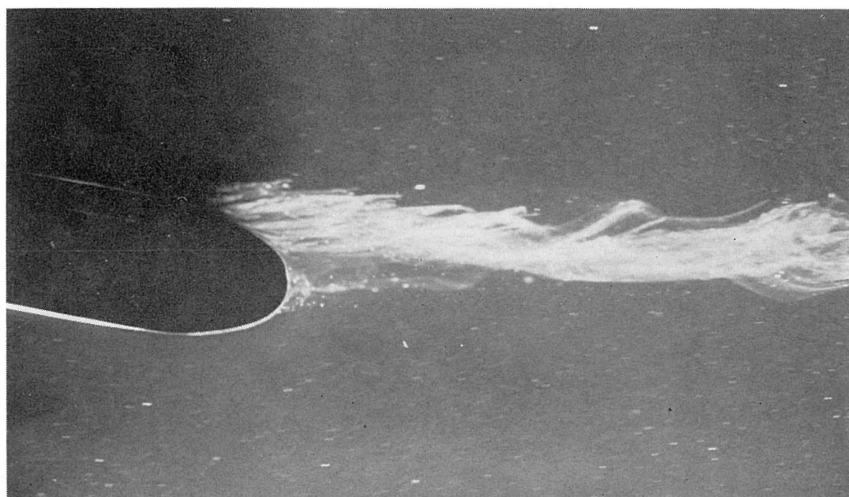
この図のように船首が右に傾いている場合には右側舷側から1本の渦糸が吐き出される。渦糸の回転方向は後方から見て反時計廻りである。船首が左に傾いている場合には左舷から時計廻りの渦糸が吐き出される。

(3-2) スクリュープロペラの後流と剝離渦

よく知られているように、スクリュープロペラの後流も実はプロペラ翼端から流れ出る翼端渦によって形成される渦糸である。一般にスクリュープロペラに流れ込んでくる流体は船底彎曲部から剝離してくる渦糸の流れとは別である場合が多く、プロペラ後流渦糸と船体からの3次元剝離渦糸とは直接には無関係であり、両者はほとんど平行して長く直線状に後方へのびている。勿論プロペラの作用で船体に沿う流れが変化を受けるので、船体剝離渦の形はわずかに変化するけれども本質的な相違は認められない。このことは直進時にも斜航時にも同様に成り立つ。しかし、2軸船においては船体からの剝離渦が



写 真 1 貨物船A模型船の剝離渦
右 5 度斜航, $R=4000$



写 真 2 貨物船A模型船の剝離渦
右 10 度斜航, $R=4500$

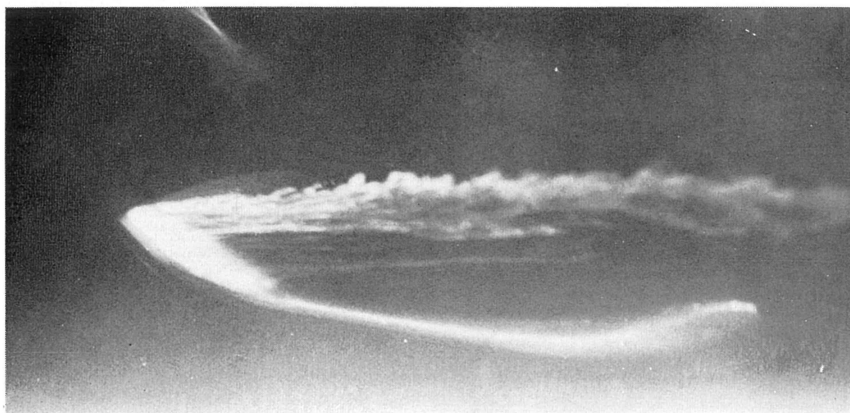


写真 3 貨物船A模型船の剝離渦
左 10 度斜航, $R=4500$, 下方より撮影

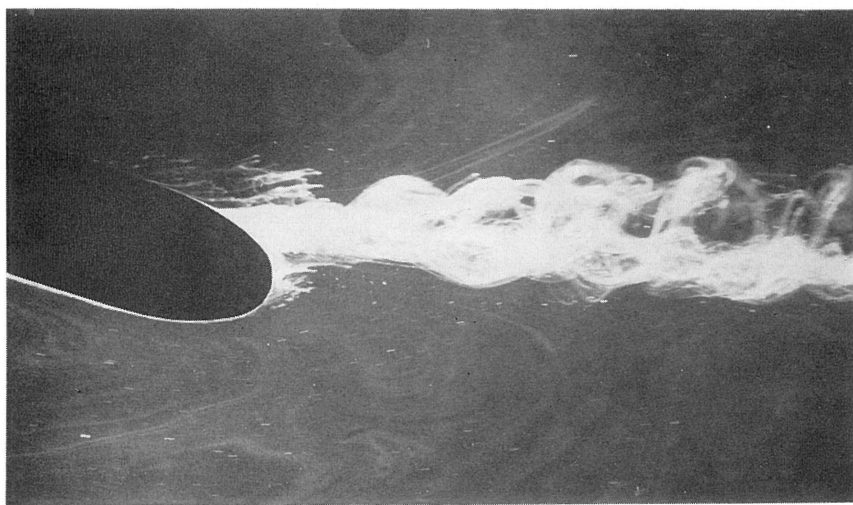


写真 4 貨物船A模型船の剝離渦
右 20 度斜航, $R=4500$

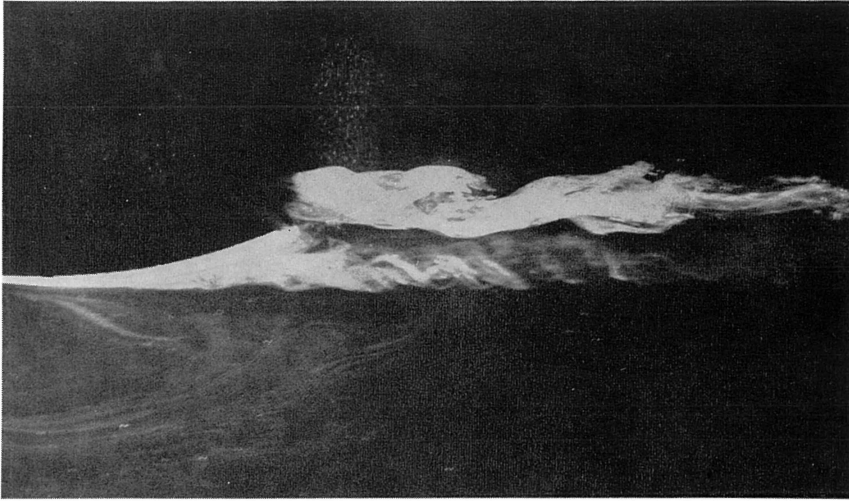


写真 5 R 型模型船の剥離渦
右 5 度斜航, $R=6000$

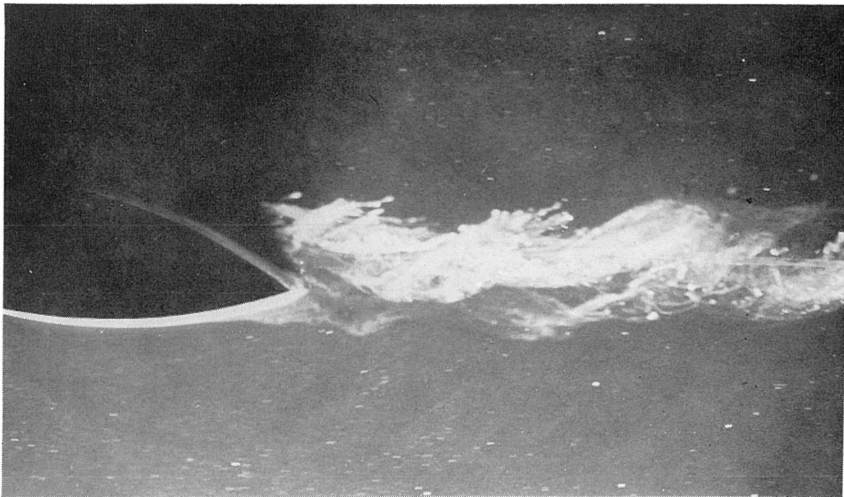


写真 6 R 型模型船の剥離渦
右 10 度斜航, $R=4500$



写真 7 R 型模型船の剝離渦
右 20 度斜航, $R=4500$

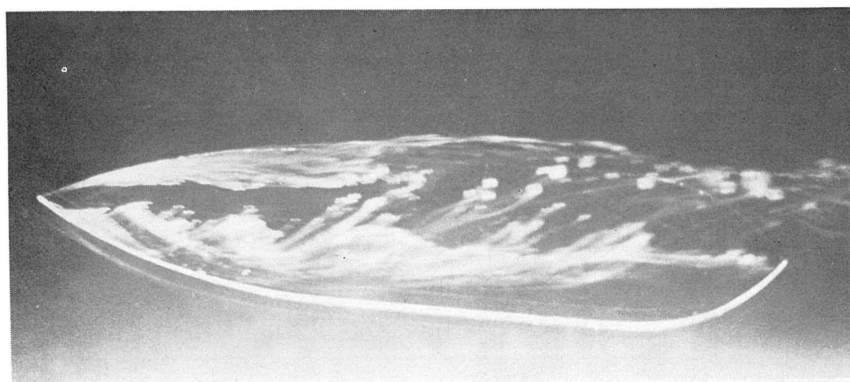


写真 8 R 型模型船の剝離渦
左 5 度斜航, $R=7000$, 下方より撮影

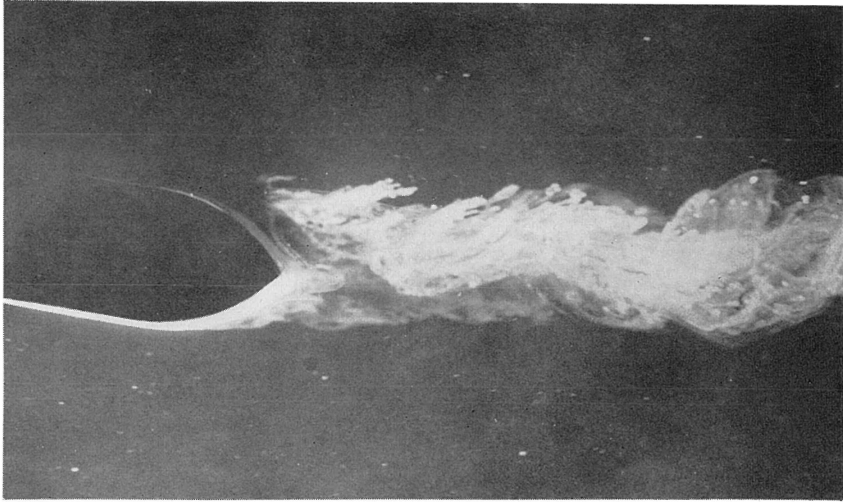


写真 9 R 型模型船の剥離渦
右 10 度斜航, $R = 4500$



写真 10 R 型模型船の剥離渦
右 20 度斜航, $R = 4500$

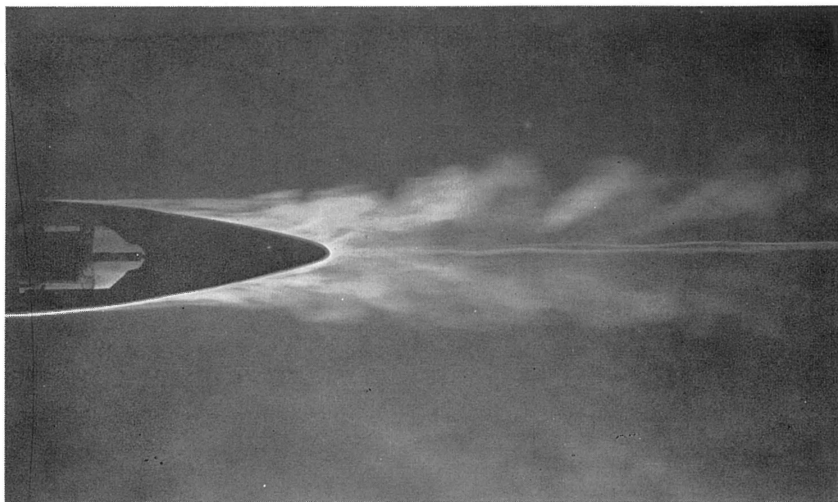


写真 11 戦艦 M 模型船の剥離渦
直進, $R=4000$

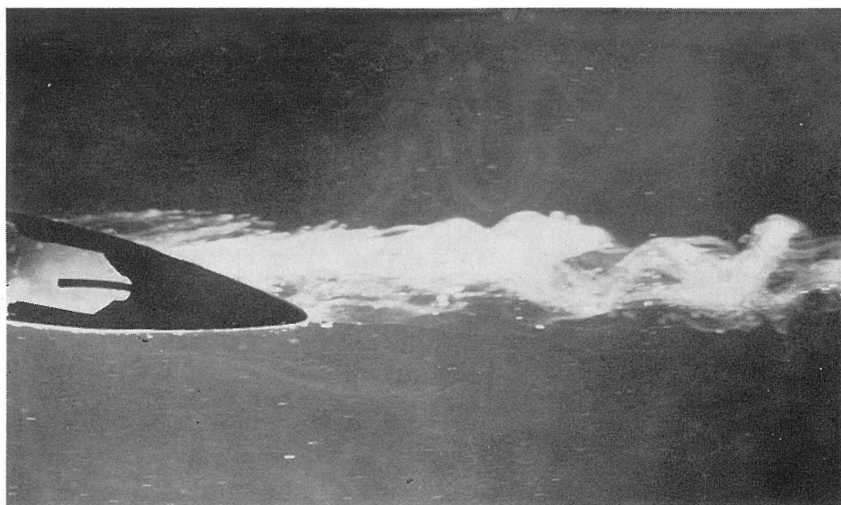


写真 12 戦艦 M 模型船の剥離渦
右 10 度斜航, $R=4500$

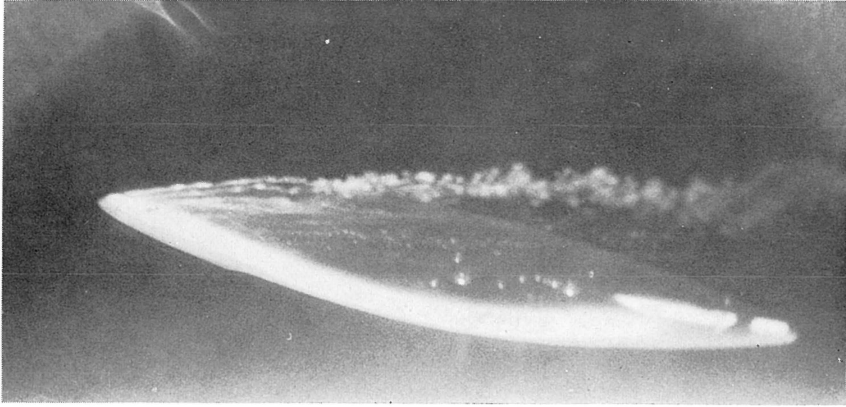


写真 13 戦艦 M 模型船の剥離渦
左 10 度斜航, $R=4500$, 下方より撮影

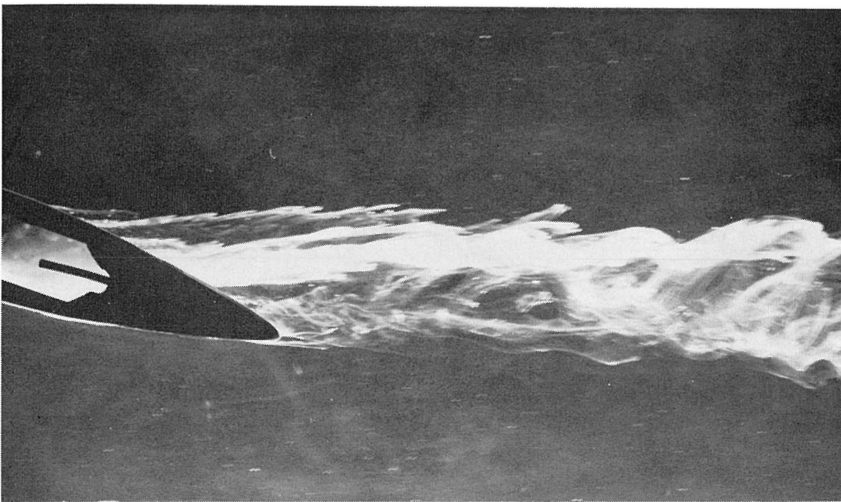


写真 14 戦艦 M 模型船の剥離渦
右 20 度斜航, $R=7000$



写真 15 戦艦M模型船が斜航する場合の剝離渦とプロペラ後流
右 20 度斜航, $R=7000$, プロペラ回転数 11 r. p. s. .

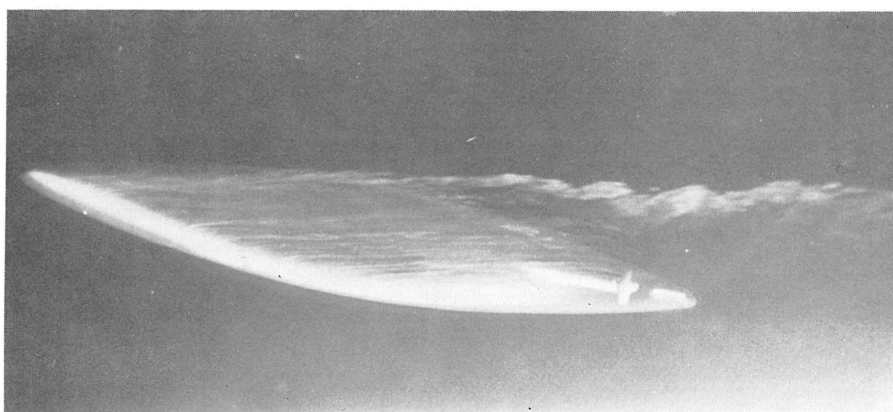


写真 16 戦艦M模型船が斜航する場合の剝離渦におよぼすプロペラの影響
左 10 度斜航, $R=7000$, プロペラ回転数 11 r. p. s. ,
下方より撮影. 写真に見られる通り, プロペラの回転は船体か
らの剝離渦に殆んど影響をおよぼさない.

丁度プロペラ付近を通過する場合があります、この場合には船体剝離渦とプロペラ後流とが重なり合って複雑な様相を呈する。写真15, 16は模型船のプロペラ後流, 写真17は実船のプロペラ後流を示す。

(3-3) 剝離渦の Reynolds 数による変化

3次元剝離渦の発生は Reynolds 数 $(\frac{UL}{\nu})$, U は船速, L は船の長さ, ν は海水の動粘性係数)にほとんど無関係であることを前報において注意したのであるが, その後, 更にこの点を明確にするために Reynolds 数 $10^2 \sim 6$ は小型水槽実験, $10^5 \sim 7$ は大型水槽実験, $10^7 \sim 8$ は実船観測の結果を総合して Reynolds 数の非常に広い範囲にわたって検討を行なった。その結果, 3次元剝離渦は極低 Reynolds 数を除いて 10^2 から 10^8 までほとんど同じ形に発生することが明らかとなった。しかし, 細かい点は勿論 Reynolds 数によって変化する。Reynolds 数 $10^2 \sim 4$ では境界層は層流であり, 3次元剝離渦は船体から離れた後ほとんど平行してはるか後方までのびている。しかし次節で述べるごとく, Reynolds 数 $10^4 \sim 6$ では, 死水域が不安定な強い非定常振動を行なうので3次元剝離渦はその影響を受けて死水域の流れに巻き込まれ, 船体から少し離れた所で見えなくなってしまう。Reynolds 数が 10^6 を越えると境界層は乱流へ遷移して死水域は縮小し安定するので, 3次元剝離渦も再び安定し, 船体から離れたはるか後方までほとんど平行して直線状を保つようになる。この状態は 10^8 まで続く。渦糸は3次的に剝離した渦層の端が巻き込んでその部分に渦度 (vorticity) が集中してできたものであるが, 同時に絶え間なく粘性に

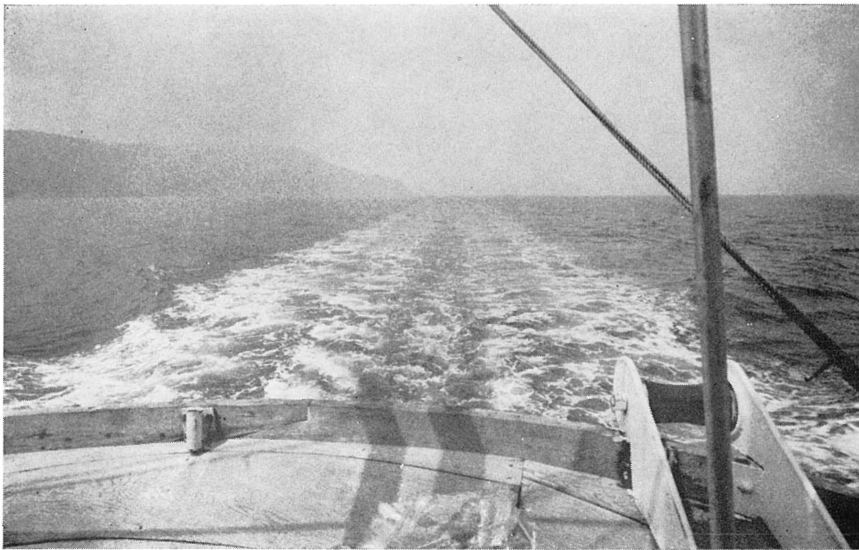


写真 17 南 星 丸 の 航 跡

船速 4.4 m/s, $R=9 \times 10^7$

航跡は渦糸の中心付近に気泡が集中してできたものであって, 中央の1本はプロペラ後流, すぐその外側の2本は船尾からの剝離渦, 一番外側の2本は船首からの剝離渦を示す。このようにスクリープロペラの後流と船体からの剝離渦とは一般に無関係である。

よる拡散が行なわれる。そして渦層の渦度のコンセントレイションが終わり、渦糸が完成すればあとは粘性による拡散があるのみで、渦糸はエネルギーを失ない、直径を増大し、ついに消散する。今層流の場合を考えると、2次元の渦糸が粘性によって拡散される有様は、よく知られているように、

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi r} \{1 - \exp(-r^2/4\nu t)\} \dots\dots\dots (1)$$

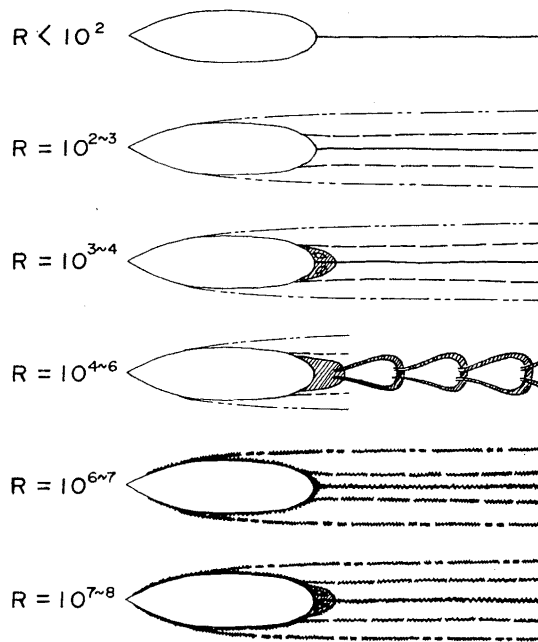
で与えられる。ただし、 v は渦によって誘起される速度の大きさ、 Γ は渦糸の強さ、 r は中心からの距離、 ν は流体の動粘性係数、 t は時間である。 v の最大値を与える r を r_0 とおけば、上式を解いて

$$\frac{r_0^2}{4\nu t} = 1.26 \dots\dots\dots (2)$$

が得られる。 r_0 は渦糸の直径を表わすものと考えてよく、時間 t の平方根に比例して増大することがわかる。船の剝離渦は主流方向に軸を持つ3次元の渦糸であるが、主流方向に直径が増大する有様は(2)式で計算してよいであろう。20°Cの水の場合 $\nu=0.01\text{cm}^2/\text{s}$ であるからそれを代入すると、 $t=20\text{s}$ で $r_0=1\text{cm}$ 、 $t=200\text{s}$ で $r_0=3\text{cm}$ 、 $t=2000\text{s}$ で $r_0=10\text{cm}$ となる。すなわち、直径1cmの渦糸が直径3cmに達するまでには180秒、10cmに達するには実に2,000秒を要する。渦糸がいかに拡散し難いものであるかわかる。上の計算は層流の場合であるが、実船の後方に現われる渦糸は乱流からできている。乱流の場合には分子粘性係数 ν の代わりに乱流粘性係数 ε を用いなければならない、 ε はReynolds数が 10^8 程度の船の場合、 ν の値の 10^4 倍位であることがわかっているの、それを代入すれば、 $t=1\text{s}$ で $r_0=20\text{cm}$ 、 $t=100\text{s}$ で $r_0=200\text{cm}$ となる。たとえば船のすぐ後方で見られる直径20cmの渦糸が直径2mに達するまでには約100秒を要する。100秒といえば20ノットの船では約1,000m航行したことになる。船の剝離渦がいつまでも消えないではか後方まで長く尾を曳くのはこのことから理解できる。

(3-4) 死水域の Reynolds 数による変化

船体からは3次元剝離渦のほかに死水を伴う剝離が独立に存在することは前報において述べた通りである。この死水を伴う剝離の方はReynolds数にきわめて敏感である。死水域の形はReynolds数のみでなく船尾の形によっても大きく変化する。一般にずんぐりした船尾の船ほど低いReynolds数で死水域が発生し、大きさも大きい。しかし船尾付近が滑らかな曲面である限り、Reynolds数（以下R数と書くことにする）による死水域の形の変化は定性的には同じであるのでそれをわかりやすく図示すれば第8図のごとくである。ただし、R数の値は色々な船の平均値を示すものである。すなわち、 $R<10^2$ では死水域も3次元剝離も無く、 $10^2<R<10^3$ では3次元剝離が発生するが死水域無く、 10^3 付近から船尾に微小な死水域が現われはじめてR数とともに増大する。 10^4 を越えると死水域の後方の流れは不安定となりカルマン渦列やチェーン状渦列を形成し、大きな非定常運動を行なうようになる。このR数の範囲でも3次元剝離渦は死水域に無関係に他のR数におけるとほとんど同様に発生しているが、船体を離れて少し後方で死水域の複雑な非定常運動に影響されて崩壊する。しかし更にR数を上げて 10^5 付近に達すると境界層は層流から乱流へ遷移して死水域は消滅または非常に縮小し、その後流は安定する。それから更にR数を上げると再び死水域は増大しはじめる。実際に南星丸実験において、dead slow ($R=10^7$)で航行する場合には死水域が存在しないが、全速 ($R=10^8$)で航行する場合にはかなり大きな



第 8 図 死水域の Reynolds 数による変化

斜線をほどこした部分が死水域を示す。点線は船尾剥離渦、鎖線は船首剥離渦、ギザギザの線は乱流を現わしている。

死水域が現われることが確認された。我々の観測は現在南星丸による 1.2×10^8 が最高であるが、秋にはかごしま丸による 5×10^8 の実験が予定されているのでその成功が待たれる。なお、以上は船尾が滑らかな曲面からなる場合であるが、cliff cut の場合には死水域の形は R 数によってあまり変わらない。写真18~23は模型船の死水域が R 数によって変化する有様を示す。

(3-5) 実船と模型船の流れの対応

以上述べたごとく、3次元剥離渦は R 数によってほとんど変化しないが、死水域の方は R 数によって複雑に変化する。特に注目すべきことは、 R 数が 10^8 以上の場合、すなわち境界層が完全に乱流の場合でも死水域の大きさは R 数とともに増大することであって、 $10^{8 \sim 9}$ の流れと $10^{6 \sim 7}$ の流れとは決して同じでないことである。3次元剥離渦の方は抵抗にはほとんど関与しないが死水は抵抗に大きな影響を与えられるので、このことは試験水槽による模型実験で、特に注意すべきことであると思われる。ところで、第1図に見られる通り、 10^8 付近の実船の流れは船体の近傍もまた船体から遠く離れた後方も含めて $10^{3 \sim 4}$ の模型船の流れによく似ていることがわかる。すなわち、 10^8 付近の実船の流れの大体の有様を手軽に知るには $10^{3 \sim 4}$ 程度の模型船実験が適当であることが結論される。

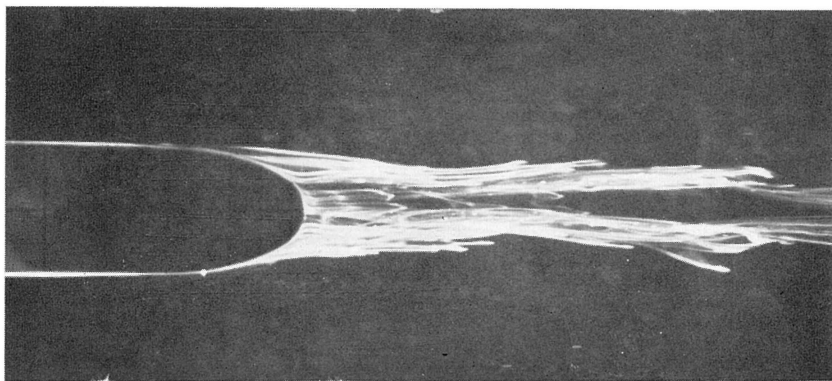


写真 18 貨物船 A 模型船の死水域

 $R = 3500$

死水域は小さく且つ安定である。2本の船尾剥離渦は死水域に無関係に後方へ尾を曳いている。

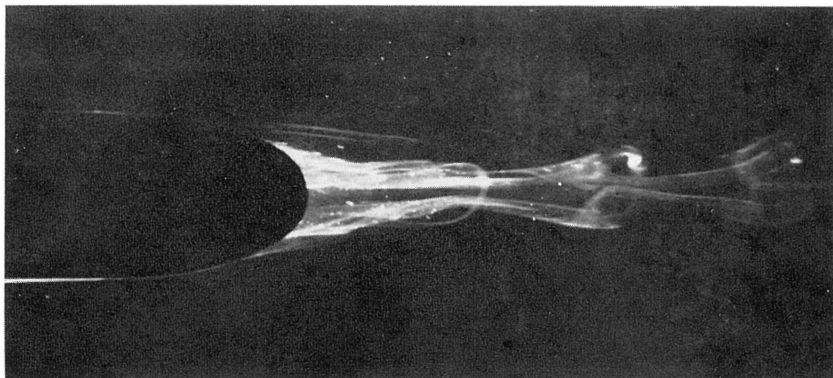


写真 19 貨物船 A 模型船の死水域

 $R = 8000$

死水域は大きく成長し、後方に非定常なチェーン状渦列を発生する。

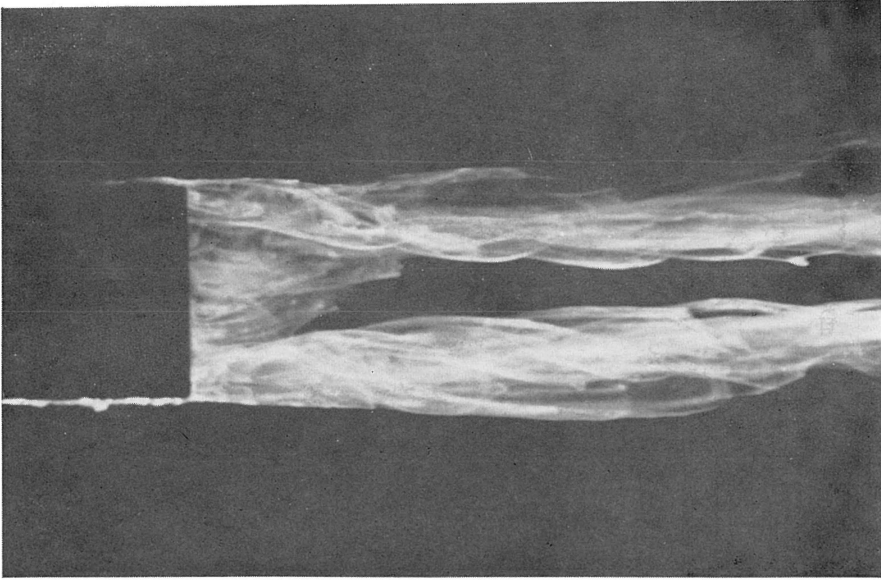


写真 20 S 型模型船の死水域
 $R=2500$

死水域は安定であり、2本の船尾剥離渦は平行して長く尾を曳く。

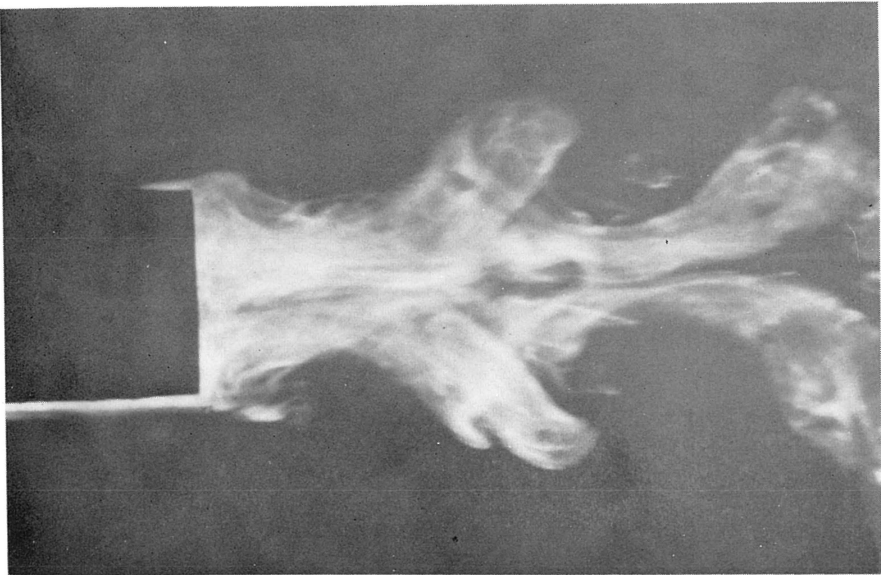


写真 21 S 型模型船の死水域
 $R=8000$

死水域は大きく発達して、はげしい非定常運動を行なう。

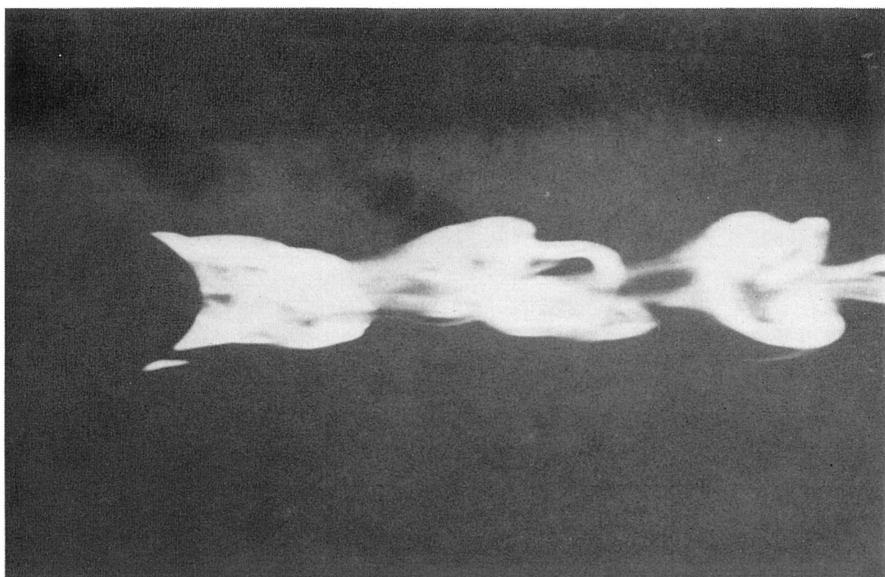


写真 22 かごしま丸模型船の死水域

$R=11000$

死水域は非定常なチェーン状渦列を形成する。

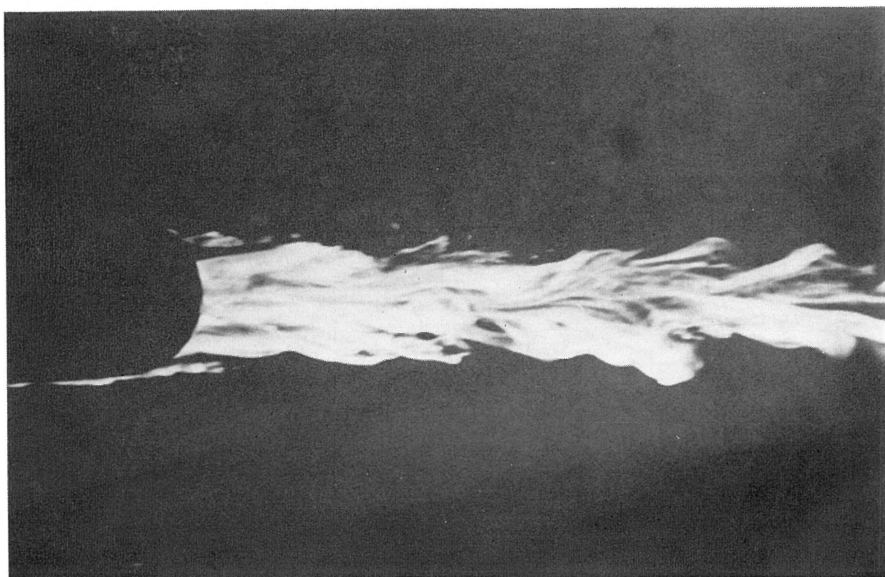


写真 23 南星丸模型船の死水域

$R=7000$

死水域は大きく発達し、非定常運動を行なう。

(3-6) 航跡と剝離渦

高速で航行する実船の後方には白く泡立つ気泡の筋が何本も平行して長く後方に尾を曳いているのが普通である。この白い気泡の筋が船の後方で閉じないで殆んど平行して遙か後方まで一定の幅を保つということは、船体表面で3次元剝離が起っていることの確かな証拠である。もしも3次元剝離が存在しないならば、たとえ死水域が存在してもそれが有限の大きさである限り、船体の流れはその後方で必ず再び閉じなければならないからである。このいわゆる航跡の白い筋は、渦糸の中心は圧力が低いので、そこに気泡が集中したものであって、要するに渦糸を示すものにほかならない。船体から発生する3次元剝離渦とスクリュープロペラの後流渦糸とが航跡を形成する。所ですべての船がほとんど例外無しにこのような航跡を残して航行しているということは、普通の船がほとんど例外無しに剝離渦を伴っているということを物語るもので、剝離渦は決して特殊な形の船の専有物ではないのである。例えば南星丸の航跡は前掲の写真17に見られる通りである。中央の1本はスクリュープロペラの後流渦糸、すぐその外側の左右2本の筋は船尾剝離渦、一番外側の左右2本の筋は船首剝離渦であって、この合計5本の渦糸がほとんど平行して長く後方にのびているのを見ることができる。

§ 4 結 言

小型模型船および実船の剝離渦をフロービジュアリゼーションにより観測した。Reynolds数 $10^2 \sim 10^8$ の広い範囲で直進時、斜航時および旋回時における3次元剝離渦、スクリュープロペラの後流、3次元剝離とReynolds数の関係、死水域およびその後流とReynolds数の関係、実船と模型船の流れの対応等を明らかにすることができた。得られた主な結果は次のごとくである。

- (1) 斜航時にはすべての船に共通に船体内側より1本の剝離渦が後方へ流れ出す。
- (2) スクリュープロペラの後流も渦糸を形成するが、船体からの3次元剝離渦とは一般に無関係である。
- (3) 3次元剝離渦はReynolds数 $10^2 \sim 10^8$ の範囲でReynolds数にほとんど無関係に発生する。
- (4) 死水域およびその後流はReynolds数および船形によって著しく変化する。
- (5) 10^8 付近の実船の流れは $10^3 \sim 4$ の模型船の流れに酷似している。
- (6) 航跡の白い筋は気泡が船体からの3次元剝離渦およびプロペラ後流渦の渦糸の中心に集中したものである。

終わりに、種々有益な御討論を頂いた船舶流体力学研究会（会長、九大造船学教室上野敬三教授）のメンバーの方々に対して、また実験に協力された若林大三君に対して深く感謝する次第である。

なお、本研究は機関研究「フロービジュアリゼーションの系統的研究」（昭和42年度～44年度）の一部であって、文部省科学研究費の援助を受けて行なわれた。

文 献

- 1) 田古里哲夫: 造船協会誌, 450号, (昭42) 14.
- 2) 仲渡 道夫: 船舶流体力学研究会で発表 (昭41).
- 3) 田古里哲夫: 第11回国際試験水槽会議で発表.
- 4) 笹島 秀雄: 日本造船学会誌, 466号, (昭43) 15.
- 5) 要 正博, 田才福造: 九州大学応用力学研究所所報 28号, (昭42) 1.
- 6) 種子田定俊, 天本 肇: 九州大学応用力学研究所所報 27号, (昭42) 1.
- 7) 熊井豊二 ほか: 九州大学応用力学研究所所報 28号, (昭42) 13.
- 8) 熊井豊二 ほか: 九州大学応用力学研究所所報 28号, (昭42) 61.

(昭和43年6月28日 受理)