

船首くび飾り渦

種子田, 定俊

天本, 肇

<https://doi.org/10.15017/6769096>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 31, pp.17-28, 1969. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

船首くび飾り渦

種子田 定 俊
天 本 肇

概 要

一般に航行中の船舶からは多数の渦糸がほとんど平行して長く後方に尾を曳いているのが普通である。その中で一番外側の渦糸は船首を取り囲んであたかも首飾り状を呈するので“船首くび飾り渦”と呼ぶことにする。この船首くび飾り渦は船首前方の水面の跳水現象の結果発生するもので、Froude 数によって支配され、Froude 数が大きいほどまた船首の形がずんぐりしているほど強く現われる。これに反し、境界層の3次元剝離の結果として船底彎曲部から発生する剝離渦の方は Reynolds 数のみによって支配され、船首くび飾り渦とは全く異なる種類の渦である。船首くび飾り渦は大きなエネルギー損失を伴うので船にとって好ましくない存在であると考えられる。なお船尾からも船首くび飾り渦と同様の跳水渦が発生するが渦の強さは一般に船首くび飾り渦よりも弱い。

§ 1 緒 言

一般に船舶が航行している時には、多数の trailing vortex を伴っているのが普通である。これらの trailing vortex の中には境界層の3次元剝離に基づく剝離渦とスクリュープロペラの後流渦が含まれていることは前に報告した¹⁾。船の trailing vortex の中にはこの他に船首付近の水面で発生して船体を首飾り状に取り囲む渦が存在することが今回発見された。これを“船首くび飾り渦”と呼ぶことにする。この渦は海水が船体に衝突して水面が上昇し、その海水の一部が入射してくる海水の上方を逆方向に流れ落ちることによって生ずるもので、いわゆる跳水現象²⁾に基づくものである。従って船首くび飾り渦を支配するのは Froude 数と船首の形状である。一方前回報告した船体剝離渦は Froude 数には無関係であり、船首くび飾り渦とは異なる種類の渦である。前回までに発表した剝離渦に関する報告ではまだこの船首くび飾り渦の正体に気付いていなかったので、単純に船首からの剝離渦の1本であると考えていた。その後実船の航跡の観察ならびに航空写真から船首くび飾り渦が剝離渦と全く異質のものであることに気づき、小型模型船実験で flow visualization を行なうことによりそれを確認した。なお、船尾でも同様の跳水現象が現われて渦が形成されるが、その強さは船首くび飾り渦よりも一般に弱い。今回は主として船首くび飾り渦について報告することにする。

§ 2 小型模型船実験

実験は回流式の小型鉄製水路で行なわれた。水路の幅は40cm、深さは40cm、長さは10mで、測定部には両側に観察用ガラス窓(26cm×84cm)がついている。水を回流させるために5KW、5インチおよび

5 KW, 3 インチの2台の渦巻ポンプが使用され, 流速の変化は水路部出口端の堰板および格子の調節によって行なわれる。測定部の流速変化の可能な範囲は 10cm/s~100cm/s である。装置の外観は写真 1 に示される。水素気泡法および熱線流速計で調べた結果, 流れの平均速度分布の一意性は十分に良好であり, また乱れもほとんど存在しない。模型船としては主に南星丸模型船を使用した。模型船の長さは 25cm である。第 1 図に正面線図を示す。流れを可視化するために水素気泡法と色素流法とを採用した。使用した色素はフルオレセイン (緑色) とローダミン B (赤色) である。

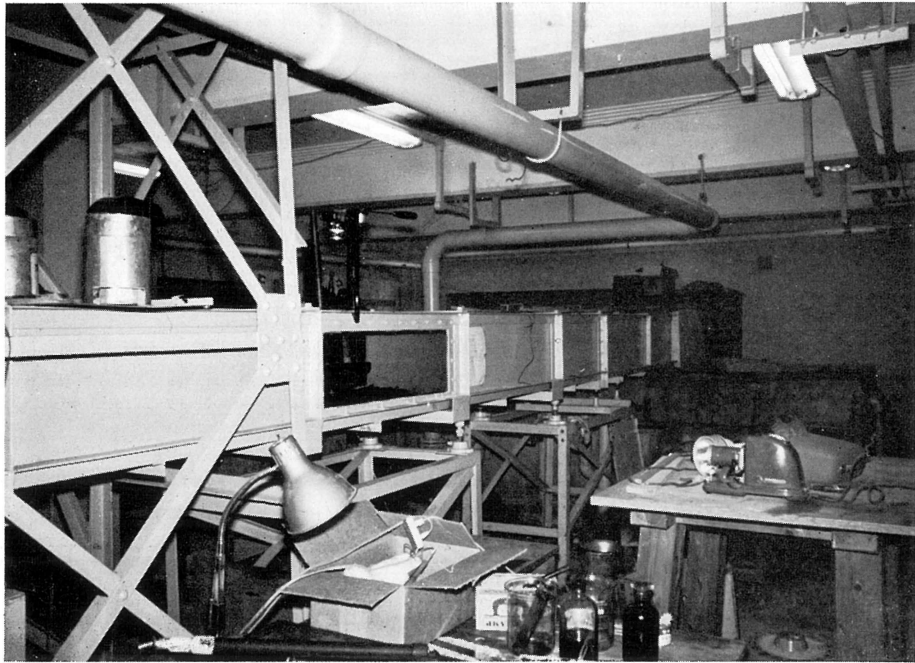
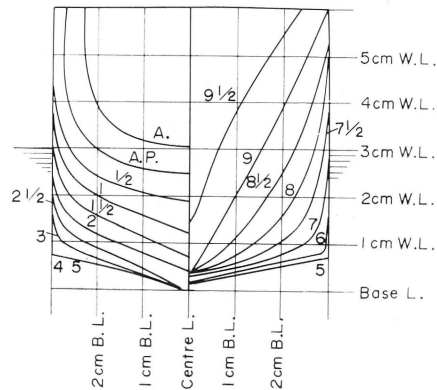


写真 1 実験水路測定部外観

水路幅40cm, 深さ40cm, 長さ10m; 測定部ガラス窓26cm×84cm; 流速10~100cm/s。



第 1 図 南星丸模型船正面線図

得られた写真の代表例を写真2～4に示す。写真2は南星丸の模型船で Froude 数 0.35 の場合である。流れは左から右へ向かっている。船首のわずか前方で水面は不連続的に盛り上がり、その内部に注射針で流し込まれた色素流は明らかに渦を巻いて逆流し、丁度水面が平水面から不連続的に盛り上がっている境界まで達し、そこから左右にわかれて船首を取り囲むような形で船側を後方へ流れ去る。写真3はその状況を上方から撮影したものである。写真から明らかなように2本の色素流は船首から少し離れた位置で船首波から離れて船体の両側を平行して後方に走り、その2本の色素流の間には色素の全く入り込まない領域が存在する。この領域には主流がくび飾り渦の下をくぐって入り込んできているわけである。写真4は船首付近の跳水の有様を側面から撮影したもので、模型船は南星丸、Froude 数は0.47である。南星丸は船首がずんぐりした形状をしているのでこのような高い Froude 数でも船首波の頂上はほとんど船首の位置にあり、その前方の波面が船首より少し前方で平水面に急角度で落ち込み、その部分に強い跳水現象をひき起こしているのを見ることができる。注目すべきことは、跳水よりも前方の水面はほとんど船体の影響を受けないことである。流れの有様を図解すれば第2図に示す通りである。実船の流れでは第3図に示されるごとく、逆流の部分は強く乱れており、水面が泡立ち、多数の気泡が水中に混入する。従って渦の前縁は白い泡の発生位置で知ることができる。



写真2 南星丸模型船の船首付近における船首くび飾り渦の構造

流速 55.1cm/s, Froude 数 0.35, Reynolds 数 1.2×10^6 。流れは左から右へ向かっている。船首の僅か前方で水面は不連続的に盛り上がり、その内部に注射針で流し込まれた色素流は渦運動を行ないながら逆流し、水面が不連続的に盛り上がっている境界まで達し、そこから船首を取り囲むような形で左右に分れて船の両側を後方へ流れ去る。

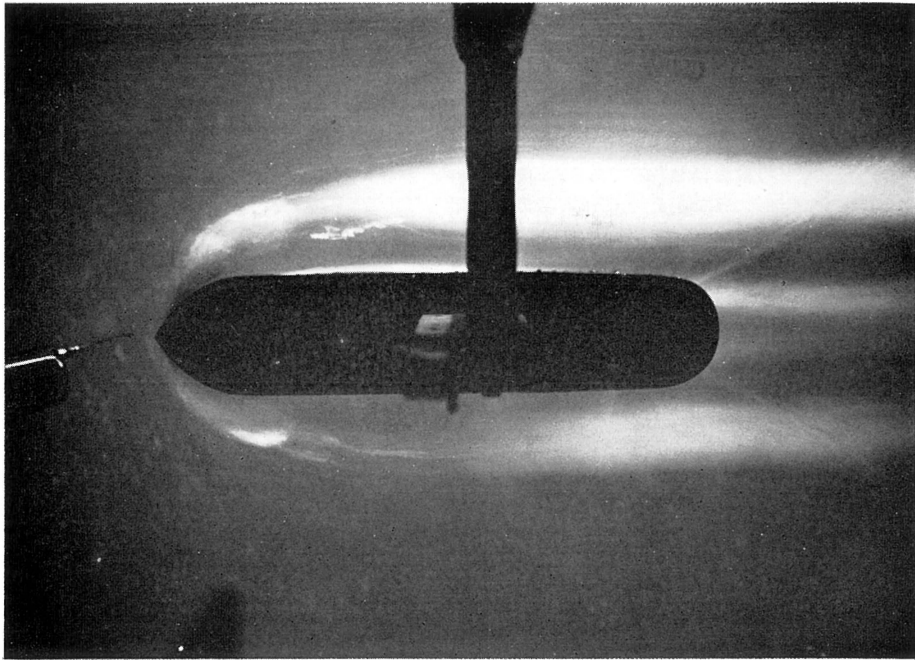


写真 3 南星丸模型船の船首くび飾り渦の全貌

流速 73.6cm/s, Froude 数 0.47, Reynolds 数 1.74×10^5 。船首の前方水面近くに注入された色素流は船首に接触する処で跳水渦の中に入り込み, 船首波前面に沿って主流を横ぎり左右に走る。しばらく船首波に沿って流れた後船首波を離れて主流に押し流され, 船体から大きく離れた位置を後方へ流れ去る。

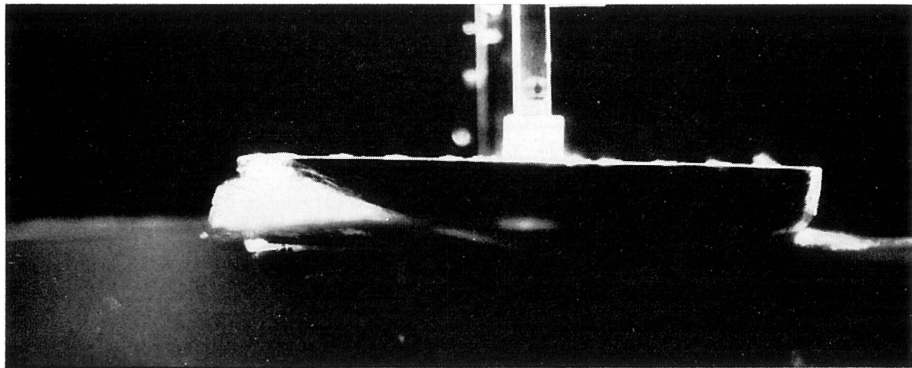
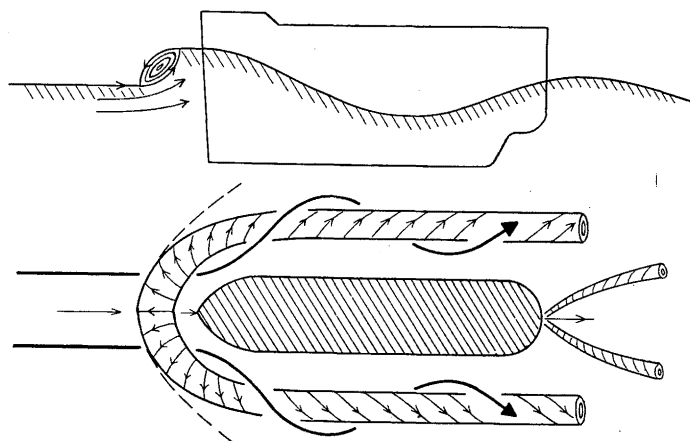
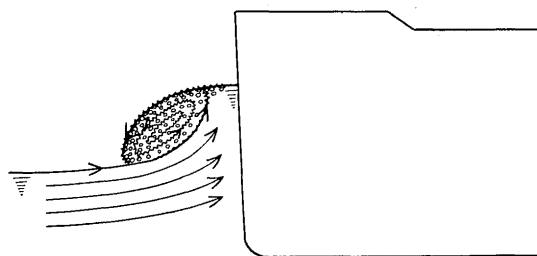


写真 4 側面から見た船首くび飾り渦

流速 73.6cm/s, Froude 数 0.47, Reynolds 数 1.74×10^5 。船首波の前面は急角度で平水面に落ち込み, その部分に強い跳水が見られる。



第 2 図 船首くび飾り渦の構造

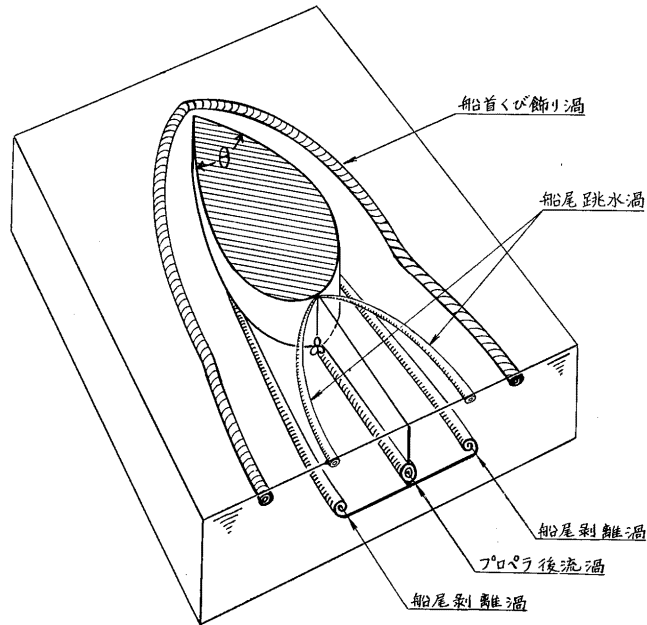


第 3 図 船首くび飾り渦と気泡の発生

船首くび飾り渦は跳水に基づく強い乱れのために水面が泡立ち、多数の気泡が渦の内部に混入する。

次に船体表面に沿う流れはどのような流線を描いて流れているのかを知る目的で、船首前方の跳水のわずか下方に色素を流し込んで観察した。色素は船体の両側面に沿って後方へ流れ、船尾で再び1本に合わさって船体から離れ去る。本実験の Reynolds 数は 10^5 を越えているので船体表面の境界層は船尾付近では乱流に遷移しており、死水域は認められない²⁾。さらに色素流を水面下深く入れると今度は色素は船体底部に沿って後方へ流れた後船底彎曲部付近で剝離して2本の船尾剝離渦を明瞭に示す。この剝離渦については前に詳しく報告した²⁾。

一般に船首くび飾り渦は Froude 数が高く船首の形がずんぐりしているほど顕著に現われる。なお、跳水渦は船尾でも発生するが、船尾跳水渦は船首くび飾り渦よりも弱いのが普通である。第4図は模型船実験の結果から得られた船の主要な trailing vortex の構造をわかり易く図示したものである。このように直進時には普通の船舶では単プロペラ船の場合7本の主要な trailing vortex が発生する。一番外側の2本は船首くび飾り渦であり、その内側に船尾跳水渦と船尾剝離渦がならび、中央の1本はスクリュプロペラ後流渦である。しかし、船尾跳水渦は船首くび飾り渦または船尾剝離渦に重なる場合が多い。



第4図 船の主要な trailing vortex

§3 実船観測

写真5～7は全速で直進する“すべいん丸”(Cargo liner, 11,000トン) および“Martita”(Tanker, 24,800トン)の航空写真である。写真に見られる通り、白い気泡の筋が船首付近から発生して船体の左右を船体から少し離れて後方へ走り、さらにそのままほとんど平行して長く後方へのびている。この渦が船体のまわりを取り囲んで真白に輝く有様は、まさに真珠の首飾りを見るような美しさである。気泡は流れとともに移動するので、白い筋は流線を示すものにほかならない。すなわち気泡による天然の flow visualization が行なわれていることになる。注目すべきことは白い筋が船体から少し離れて存在することで、このことは白い筋と船体の間には一般流が白い筋の下をくぐりぬけて入り込んでいることを示す。これは白い筋が渦であることの明白な証拠である。また船尾からは2本の船尾跳水渦がハの字状に発生しているのが明瞭に認められる。

次の写真8は自動化タンカー“泰光山丸”の航空写真であるが、船首に著しい跳水現象が認められ、白く泡立つ渦の筋が船体のまわりを首飾り状に取り囲んでいるのを見ることができる。同じ写真に船尾跳水渦も白い筋としてはっきりと現われている。船首くび飾り渦および船尾跳水渦はこの他にもたとえば造船協会論文集に掲載された高幣、乾両氏の“くれない丸”(高速客船, 2,928トン)の航空写真⁹⁾にも明瞭に現われている。

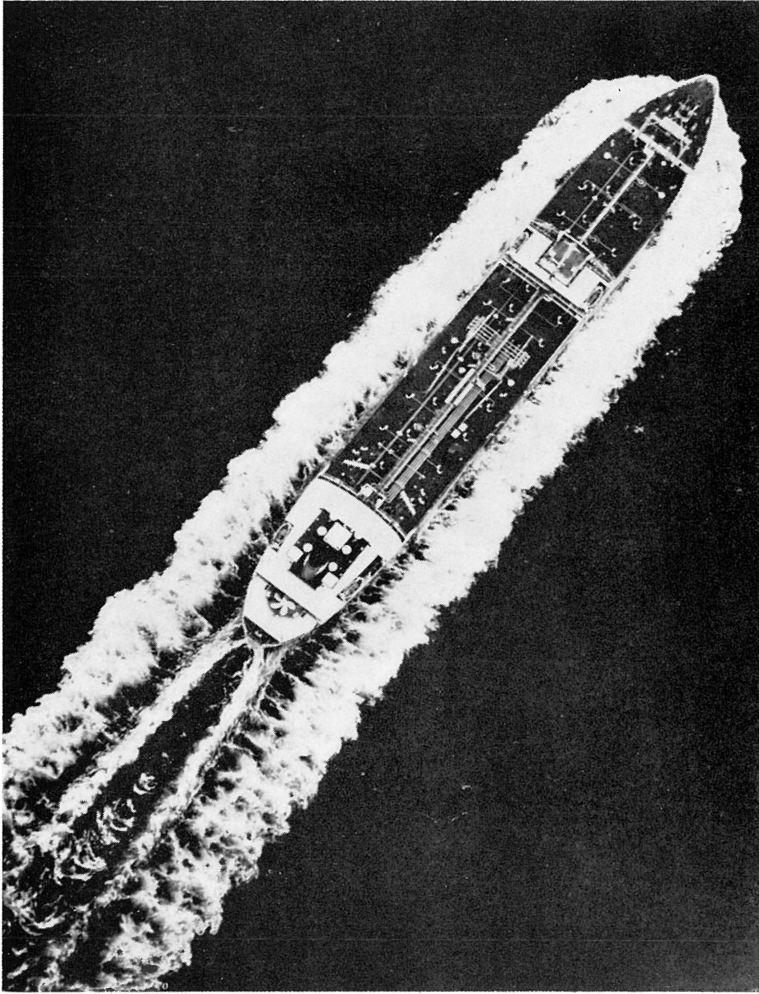


写真 5 Martita (Tanker, 24,800トン) の船首くび飾り渦

船首波前面で強い跳水があり、その結果生じた真白な気泡は船首から少し離れた所で船首波から離れて主流に押し流され、船体から離れた位置を殆んど平行して後方へ流れ去っている。なお船尾にも2本の跳水渦が明瞭に認められる。

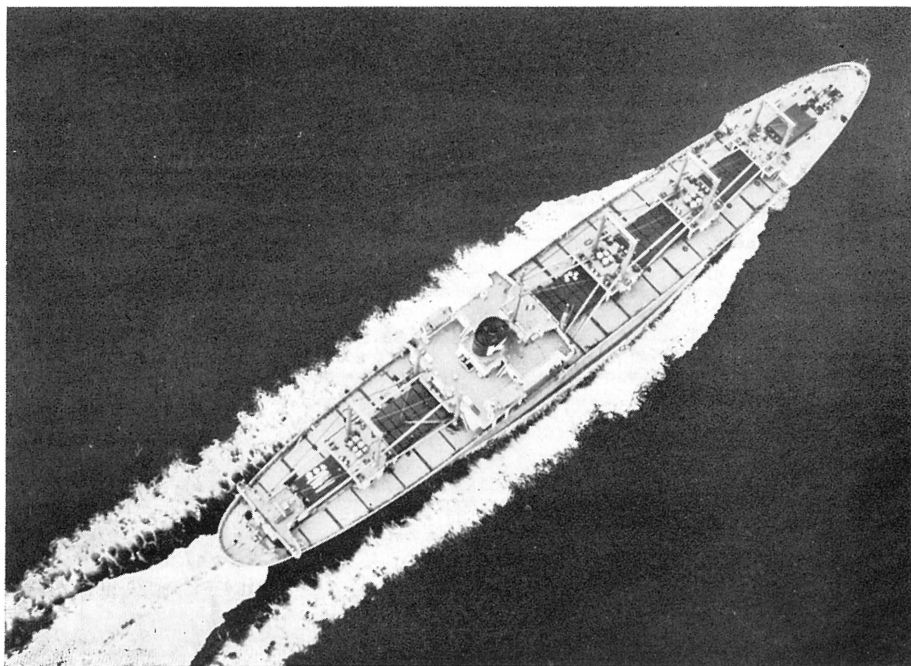


写真 6 すべいん丸 (Cargo liner, 11,000トン) の船首くび飾り渦

船首に斜めの跳水が見える。一般に斜めの跳水に基づく渦は垂直跳水の渦よりも弱いので、すべいん丸の船首くび飾り渦は Martita (写真5) のそれよりも弱い。



写真 7 斜め後方から見たすべいん丸の船首くび飾り渦

船首付近で斜めの跳水が起こって白い泡を発生している。気泡は跳水の消える付近から船首波を離れて後方へ流れ出している。なお船尾にも強い跳水が認められる。

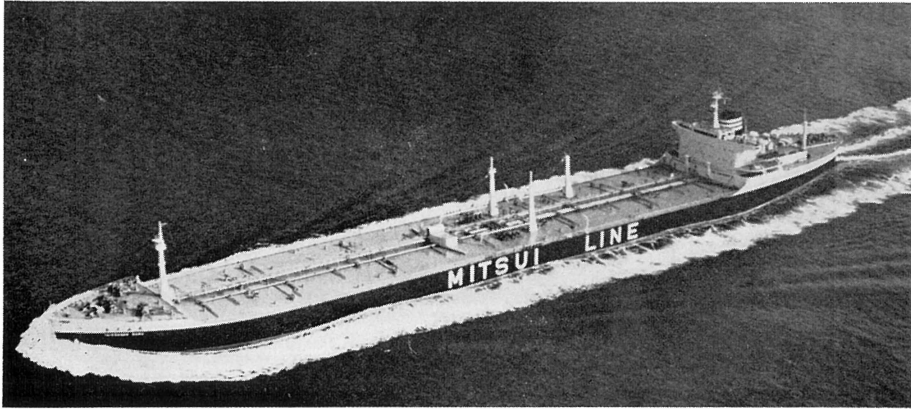


写真 8 泰光山丸（自動化タンカー）の船首くび飾り渦

船首を取り囲んで見事な白い気泡の発生が見られる。白い気泡の発生する領域は、水面が平水面から不連続的に盛り上がり、船首くび飾り渦が跳水に基づく渦であることを示している。また船尾からは他の写真と同様に 2 本の跳水渦が発生しているのが見える。

§ 4 議 論

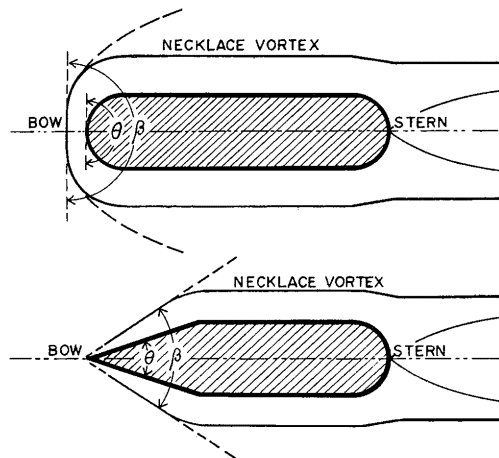
船首くび飾り渦および船尾跳水渦はそれぞれ船首波および船尾波の跳水現象の結果現われるものである。船が静止の状態から動き出し始めると、最初の瞬間は完全流体のポテンシャル流れが実現される。船首では圧力の上昇が起り、船首に接する部分の水が押し上げられる。押し上げられた水の部分は次々にその前方の水を押し上げて行くが、その場合これらの水面波は、それぞれの場所に特有の波速で前方に伝えられる。船首に接する部分の水面の高さは時間とともに増大し、船首に近い方の攪乱の進行速度はその前方の小さな波の進行速度よりも常に大である。それは表面波は波高によって波速が異なり、波高大なるほど波速が大きいからである。その結果後方の波は次第に前方の波におし迫り、水面の形は次第に急傾斜してついには段波を形成するに至る。最終的には段波は船首の前方一定の距離の所で停止し定常状態になる。ただし、ここで注意しなければならないのは、ここに段波というのは水面の勾配が不連続であるという意味である。その時段波は船に対して静止していることになり、従って静水に対しては船の速度 U で前進していることになる。波速 U を持つ表面波の波長は $\lambda/L = 2\pi F^2$ で与えられる。ここに λ は波長、 L は船の長さ、 $F(=U/\sqrt{gL})$ は Froude 数である。

この事情は、水面の高まりを空気の密度の増加で置きかえれば、空気中を超音速で進行する物体の前方に発生する衝撃波に対応する。段波や衝撃波の不連続面形成の原因の核心をなすものは、水面波や衝撃波の波速が振幅によって異なるという性質である。水理学の方でよく知られている水路の跳水現象も、水路の波の速度が水深によって異なるという性質から不連続面を形成するのである。さて、このようにして船首前方に段波が形成されると、続いてそこに流れの剝離の現象が起り、その部分に逆流を生ずる。逆流は強い乱れを伴い、その結果水面は泡立ち、多数の気泡が水中に混入する（第 3 図）。

逆流は一つの渦を形づくり、船首から少し離れると船体から発生する膨脹波に薄められて跳水は次第に弱くなり、段波は普通の波に変わり、渦は波から離れて主流に押し流され、船体の両側をくび飾り状に取り囲んで後方へ流れ去る。重要なことは、船首近傍では船首波の波面とくび飾り渦とは一致しているけれども、船首から少し離れて跳水現象の消える位置でくび飾り渦が船首波から分離することである。

一般に船の波の速度は波長が減少するとともに減少するけれども、ある波長以下では表面張力の影響でかえって増大する。水の場合その臨界波長は 1.7cm、臨界波速は 23cm/s である。従って段波を発生するためには少なくとも 23cm/s 以上の船速が必要である。しかし船速が 23cm/s を越えても 40cm/s 位までは跳水は波状跳水の形で現われ、はっきりした表面渦は形成されない。きれいな表面渦が現われるのは 40cm/s を越えてからである。このことは小型模型船実験を行なう場合に特に注意する必要がある。船速 40cm/s 以下では単に Froude 数を合わせるだけでは実船に対応するくび飾り渦を発生させることはできないのである。表面張力は水面波に影響を与えるだけでなく水表面の跳水による泡立ちにも影響する。小型模型船実験ではそのために白い気泡の筋は実船の場合に比べて非常に弱く現われる。しかしこのことは、人工的に flow visualization を行なうためにはかえって好都合である。

跳水はまた船の形状によっても支配される。ずんぐりした船首の前方には主流に直角な跳水が発生するが、鋭くとがった船首の場合には船首から斜め後方に向かって跳水が現われる。跳水の方向と船首の角度 θ 、Froude 数 F との間には一定の関数関係がある。第 5 図において、跳水の角度 β は θ が小さいほどまた Froude 数が大なるほど小さくなる。この斜めの跳水の角度 β と θ 、 F の関係は定性的に空気中を超音速で進行するくさび状の物体の先端に発生する斜め衝撃波に対応する。ただし斜め衝撃波の場合には Froude 数のかわりに Mach 数が関係する。船尾跳水渦も同様に空気中を超音速で進行する物体



第 5 図 船首の形状による船首くび飾り渦の形の変化

船首がずんぐりしている場合は垂直跳水（上図），船首がとがっている場合には斜め跳水（下図）が現われる。

の後端に発生する斜め衝撃波に対応している。跳水現象は強い乱れと渦運動を伴うので大きなエネルギー損失を発生する。このエネルギー損失は斜めの跳水よりも直角な跳水において著しい。従って、船の形がずんぐりしているほど、また Froude 数が大なるほど跳水によるエネルギー損失は大である。

なお、船首くび飾り渦と非常によく似た形の渦に物体表面の境界層内に現われる馬蹄渦 (Horseshoe vortex) がある⁹⁾。これは物体表面に突出物がある場合にその突出物を取り囲んで馬蹄形の渦が形成されるものである。馬蹄渦は境界層内に突出物があるための圧力勾配に基づく 2 次的流れの結果として現われるもので、馬蹄渦を支配するのは Reynolds 数である。従って Froude 数によって支配される船首くび飾り渦は馬蹄渦とは全く種類の異なる渦である。

おわりに、“すべいん丸”および“Martita”の見事な航空写真を御貸与下さった川崎重工業株式会社ならびに同社基本設計部性能班の岡本洋氏の御好意に対して深く感謝の意を表す。また若林大三君には直接実験を手伝っていただいた。その他流体部全員の方々から直接、間接の御援助をいただいた。記して厚く御礼を申し上げる。なお本研究は文部省科学研究費の補助によって行なわれたものである。

文 献

- 1) 種子田, 天本: “船の剝離渦 I”, 九大応力研所報, 第27号, (1967), 1.
- 2) 種子田, 天本: “船の剝離渦 II”, 九大応力研所報, 第29号, (1968), 41.
- 3) 例えば Rouse 編: “Engineering Hydraulics” Wiley (1950), 543.
- 4) 種子田: “流体運動の Visualization” 日本物理学会誌, 23巻, 6号, (1968), 430.
- 5) 高幣, 乾: “高速客船くれない丸における Waveless Bulb の船首波打消しに関する研究”, 造船協会論文集, 第110号, (1961), 105.
- 6) 例えば Thwaites 編: “Incompressible Aerodynamics” Clarendon Press, Oxford (1960), 552.

(昭和44年 5月14日 受理)