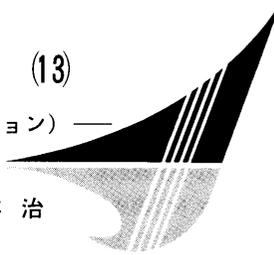


船型学 50年 (13)

— 続・新しい流れ (キャビテーション) —

乾 崇夫 ・ 加藤 洋治



1月号の訂正とむすび

1月号の訂正は次の1ヶ所で、筆者の校正ミス。

p. 85 右 下から14行目：期が同じく→期を同じく
昨年12月9日、まだ1月号の原稿と取組んでいるところに、早くも加藤先生から本号の原稿が届いた。有難く拝見したところ、高速研25年の研究の流れが、素人にも判り易く、しかもウラにある考え方、発想の経緯も要領よくまとめられている。これまで高速研での研究は、その都度伺っていたつもりであったが、今回の原稿で全体的流れが大変よく把握できた。厚く御礼申し上げる。なお、別表A(9月号)が1990年までになっていたのので、その後の分を補遺として末尾に添え別表Bと合わせた。

以下、加藤先生の原稿をそのまま掲載させて頂いた。

× × ×

東京大学の船舶流体力学研究のもう一つの新しい流れとして、キャビテーションの研究について述べる。

キャビテーション

キャビテーションという言葉は、最近では映画にもなった小説「レッドオクトーバーを追え」や人気マンガ「沈黙の艦隊」などでおなじみの方も多くなって来たが、以前は専門家しか知らない特殊な言葉だった。キャビテーションという現象は液体が加速され、圧力が減少し、ついには蒸気圧より低くなって気化し、アブクが発生するという現象である。

水の蒸気圧はよく知られているように温度100度で1気圧、逆に言えば、1気圧の圧力下では温度が100度より低い水は沸騰しない。20度の場合はどうであろうか。20度の水の蒸気圧は約0.02気圧なので、そのような低圧になると20度の水でも沸騰を始める。プロペラ翼チップの速度や、ハイドロフォイル翼の速度は30~40 m/sにも達するから、翼表面の圧力は簡単に蒸気圧より低くなり、そこから水蒸気の泡が発生したり、翼が気膜状の

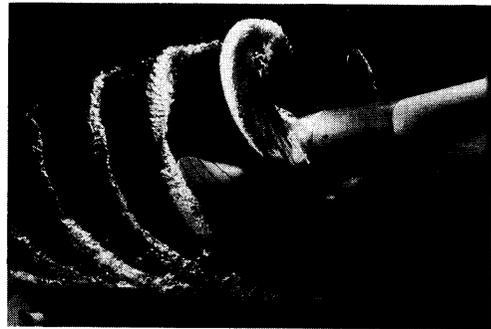


写真13・1 プロペラのキャビテーション

水蒸気で覆われてしまったりする。これがキャビテーション現象である。

プロペラのキャビテーション

写真13・1は高速艇用プロペラの模型を試験している様子で、翼の前半部は気膜状のキャビテーションで覆われ、翼端からは渦キャビテーションが発生し、ラセン状に下流にのびている。プロペラにこのようなキャビテーションが発生すると、性能の低下、騒音や振動の増加、エロージョンの発生などの悪影響が生じる。キャビテーション気泡がつぶれる時、つぶれる最終段階において数万気圧の高圧が一瞬発生する。これが圧力波となってまわりへ伝播し、騒音の原因にも、エロージョンの原因にもなる。潜水艦がキャビテーションの発生をきらうのは、この騒音を探知されてしまうからである。

キャビテーション研究のはじまり

東京大学船舶高速力学研究室のキャビテーションの研究のはじまりは、もう20年以上にもなる。当時は造波抵抗や粘性抵抗の研究が日本では盛んで、欧米がどちらかという、プロペラやキャビテーションの研究が多いのと対照的であった。高速研では面白そうなことは何でもやろうという考えの研究室なので、研究のスペクトラム

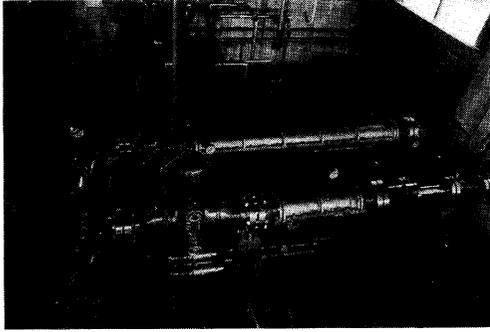


写真13・2 高速キャビテーション・タンネル

はかなり幅広いものだったが、キャビテーションは中心的なテーマであった。

1966年に田宮 真教授が東京大学生産技術研究所から移られ、高速研が発足するとまず第一に手がけたのは実験装置であるキャビテーション・タンネルの設計・製作であった。乾先生が12月号に書かれているように、講座の新設と後援会の御寄附のおかげで新しい実験装置を購入出来るようになった。高速研にふさわしい実験装置を、ということになり、高速のキャビテーション・タンネルを作ることにした。

高速キャビテーション・タンネル

限られたお金で特徴を持たせることを考えると、試験部の流速を出来るだけ上げることはよい考えであった。製作を担当してくれた荏原製作所の人達と議論して、結局、写真13・2のような装置を計画した。試験部は直径3cmの円筒形で大変小さいが、最大流速は80m/s。他のキャビテーション・タンネルではせいぜい20m/sであることを考えると、これは桁ちがいに速い。エロージョンは流速が速くなると急激に増加するから、短時間にエロージョンの実験をすることが出来るというメリットもある。

このような高速では動圧が大きいため(80m/sでは32気圧)、むしろ加圧してキャビテーション試験をする必要がある。そのため装置は50気圧まで加圧することが出来る耐圧容器となってしまった。また68kWのモータで駆動し、タンネル内の水の量は200ℓ程度なので、そのままでは水温がどんどん上昇してしまう。冷却ジャケットをつけ、さらに冷却水をクーリングタワーで冷やすという方法で、なんとか水温の上昇を40度程度に押さえた。

キャビテーションは観察が重要なので、高圧・高温にたえるノゾキ窓をということで、結局、石英のブロックを、目的の形状に研磨したものを試験部に取りつけた。

また第2の試験部として断面が12cm×2.5cmの長方形

で、流速が35m/sまで出せる試験部を作って、交換して使用出来るようにした。この試験部は流速はやや低いが、小さな翼形を実験することが出来、大変役にたった。

初期の研究

キャビテーションの研究は大学では東北大学で、船用プロペラについては船舶技研(当時運輸技研)や三菱長崎で行われていたが、田宮教授は船の運動、加藤は伝熱学が専門ということで、手探りの状態からのスタートだった。幸い優秀な大学院学生がサポートしてくれた。右近君(現船舶技研)は有限幅翼のキャビテーション、宮田君(現東大)は振動翼のキャビテーション、高川君(現海洋科学技術センター)は気泡核とキャビテーション発生との関係、佐藤君(現防衛庁技研)はエロージョンが研究テーマだった。11月号で登場した宮田先生の研究のスタートがキャビテーションであったことを考えると一寸楽しい。

キャビテーション発生メカニズム —— 気泡核 (49)

最初に述べた「静圧が蒸気圧より低くなればキャビテーションが発生する」といういい方は第一近似としては正しいが、実際を見ると現象はもう少し複雑である。

キャビテーションはその様子から、

- (1) バブル・キャビテーション
- (2) シート・キャビテーション
- (3) クラウド・キャビテーション
- (4) チップボルテックス・キャビテーション

などと分類される。写真13・1のプロペラでは(2)のシート・キャビテーションと(4)のチップボルテックス・キャビテーションが発生している。いずれにしても水蒸気の泡が成長してある大きさになった時、キャビテーションとして影響が出て来る。

水が水蒸気になる時、気泡の核になるものが存在しなければならぬ。一寸考えると、ごく小さな水蒸気泡が出来、それが成長すればよいのではないかと思われるが、ごく小さな気泡は気泡の表面に生じる表面張力のために、つぶされてしまうはずである。このような考察から、キャビテーションの発生にはその核となる空気の小さな泡が必要で、この気泡の中に水蒸気が蒸発して成長するというメカニズムが考えられている。この微細な空気泡は気泡核と呼ばれ、水の中に浮遊していたり、物体の表面に附着したりしている。もし物体の表面がきれいで、水の中にも気泡核がなかったら本当にキャビテーションは発生しなくなるのであろうか。こう考えて簡単な実験を

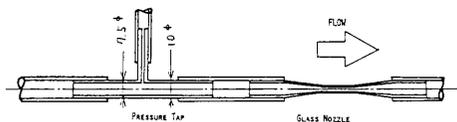


図13・1 キャビテーション発生実験用ノズル

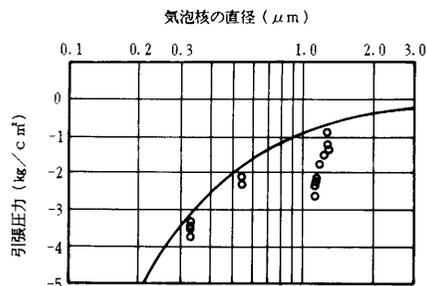


図13・2 気泡核の大きさとキャビテーションの発生

行ってみることにした。それが前述の高川君の研究である。

その頃、メンブレン・フィルタと呼ばれる孔径のそろったフィルタが開発され、これで水を濾過すればゴミも気泡核も取り除けないかと考えた。小さな気泡は表面張力による力が相対的に大きくなるため、剛体のようにふるまうからである。このようなフィルタで濾過した水を図13・1のようなガラス管を引きのばして作ったノズルに流して、ノズル部でのキャビテーションの発生を調べた。フィルタの孔径はいろいろなサイズのものが売られているから、それらを取り換えて実験すれば、ノズルを通過する水に含まれる気泡核の最大の大きさを変えてやることが出来る。

図13・2に見られるように孔径の小さなフィルタで濾過した水は、キャビテーションが発生しにくくなっていて、ノズルでの圧力が -3 kg/cm^2 になっても、発生しない場合がある。 -3 kg/cm^2 では圧力というより、水の引張力といった方がよい状態である。教科書などにはこのような状態の水は安定には存在しないと書いてあるが、そうではない。なお、図中の曲線は理論計算の結果で、実験値はこの曲線より下に来るはずである。

T E型キャビテーション・タンネル (61, 65, 67, 78)

この結果に力を得て、水中の気泡核の大きさや数をコントロール出来るタンネルを作った。東レ科学振興会のご援助を得て建設したT E型キャビテーション・タンネル、がそれである。図13・3に見られるように、ポンプを出た水はフィルタタンクに入り、60本の筒形フィルタの孔をくぐりぬけて、整流部に入り、試験部に達する。整流

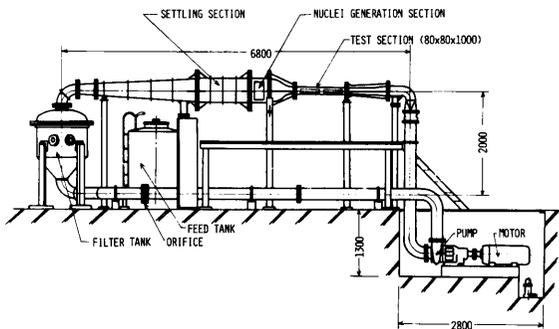


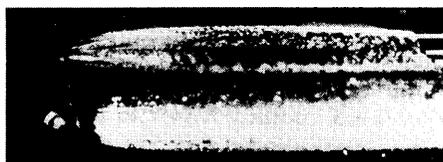
図13・3 T E型キャビテーション・タンネル

部と試験部の間に電極線を格子状に配置して、電流を流し水素の微小気泡を発生出来るように工夫した。フィルタで気泡核を減少させ、一方、電気分解で気泡核を増加させることが出来る訳である。

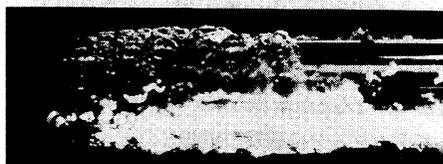
写真13・3はT E型タンネルでの実験の例で、試験体は先端が半球の軸対称体である。気泡核が少ない場合にはキャビテーションは発生しにくく、発生しても上の写真のようなシート・キャビテーションである。まったく同じ状態で電気分解により気泡核を増加してやると、下の写真のようになり、バブル・キャビテーションになってしまう。このように気泡核の多寡によって発生するキャビテーションの様子はまったく異なってしまふ。

キャビテーション発生メカニズム — 境界層

低圧と気泡核はキャビテーション発生に重要だが、それだけでは十分ではない。気泡核が成長してキャビテーション気泡になるための時間と場所が必要である。キャビテーションの発生は固体表面のすぐ近くで起きるから、



(a) 気泡核が少ない場合 — シート・キャビテーション



(b) 気泡核が多い場合 — バブル・キャビテーション

写真13・3 気泡核によるキャビテーションの変化

そのあたりの流れ、すなわち境界層の特性に大きく影響される。このことは20年程前に注目されはじめ、キャビテーションに対する我々の見方に大きな影響を与えるものであった。(1)(2)

例えばシート・キャビテーションは必ず境界層の剥離域に発生する。境界層が層流から乱流へ遷移する所でもシート状のキャビテーションが発生するが、剥離域に発生したものと様子が明らかに違っている。剥離も遷移もしていない境界層ではキャビテーションは発生しにくく、発生してもバブル・キャビテーションである。

船のプロペラではシート・キャビテーションが発生することが多いが、その範囲を予測するには圧力分布の計算の他に境界層特性の計算が不可欠になる。

キャビテーションの制御 (63, 64, 69, 74)

さらに考えを進めると、前に述べたように気泡核の大きさや数を制御したり、キャビテーションが発生する部分の境界層を変えてやったりすると、キャビテーションの発生や、タイプ、大きさなどを制御することが出来ることになる。このようなことを考えて昭和50年頃からキャビテーション発生予測や制御についての研究を始めた。

まず興味があったのはプロペラでよく見かけるシート・キャビテーションと境界層特性の問題である。プロペラ翼はその断面を切ってみると、飛行機の翼と同じ翼型の形状をしているから、翼型について研究してみればよい。実験してみると図13・4のような結果が得られた。確かにキャビティ前縁は境界層の剥離点に一致し、キャビティの中の圧力は蒸気圧に等しいから圧力は図13・4の下図のようになっていいる。それより前方の部分は蒸気圧より低い圧力が保たれているのに、シート・キャビテーションはそこでは発生していない。このように蒸気圧より低い圧力の領域が安定に存在していることは驚くべきことである。この部分の圧力を計るには一寸した工夫がいる。圧力穴を開けると、その点からキャビテーションが発生してしまうからである。結局、レーザー流速計で境界層外縁の流速を計り、ベルヌイの式から圧力を間接的に求めた。

物体の抵抗を減らすために境界層の制御をすることは

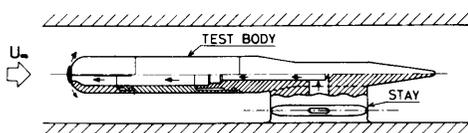


図13・5 吹き出し実験用試験体

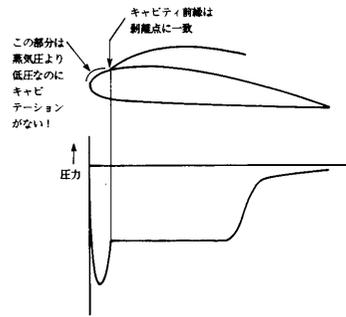


図13・4 キャビテーションと圧力分布

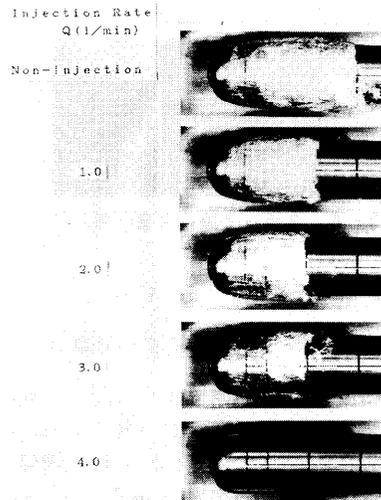


写真13・4 吹き出しによる制御

以前からよく行われている。例えば谷一郎教授の層流翼型の研究は有名である。キャビテーションを減らすために翼型の圧力分布を蒸気圧よりわずかに高い圧力に保つという工夫もよく行われている。ところが上に述べた結果によれば、境界層の特性を変えることによってキャビテーションの発生を押さえることが出来ることになる。

吹き出しによる制御 (75, 92, 113)

例えば層流剥離している境界層の中に壁面から水ジェットを吹き出すと、剥離が消えて、同時にシート・キャビテーションも消えてしまうことになる。さっそく図13・5のように軸対称体の先端近くにリング状のスリットを作り、内部から水を吹き出すという実験をやってみた。結果は写真13・4に見られるように吹き出す水量を多くすると、キャビティの長さがだんだん短くなり、ついにはまったく消えてしまった。このように頭の中で考えたことが、実際にも起きる事が見事に証明されると楽し

船の科学

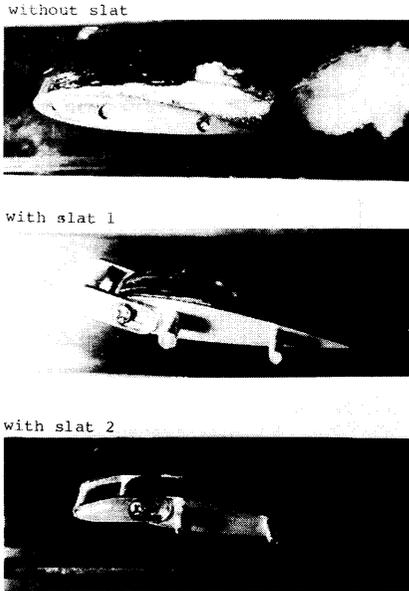


写真13・5 スラット翼による制御

い。研究の醍醐味とでもいえようか。

前縁小翼（スラット翼）による制御 (96, 102)

吹き出しによる制御は大変うまく行ったが簡単ではない。要は境界層の剥離を防げばよいのだから、剥離する直前で境界層を乱してやってもよい。飛行機屋さんは翼面上に小さな板をならべて、その板からわざと剥離を起こさせ、発生した渦により主翼の剥離を防ぐという方法を採用している。(ボルテックス・ジェネレータと呼ばれる)。このボルテックス・ジェネレータをキャビテーション翼に採用しようとする時、ボルテックス・ジェネレータからキャビテーションが発生し、それが主翼のキャビテーションを誘起することになって、具合が悪い。

そこで主翼の前に小さな翼をつけ、その翼の伴流が主翼の境界層に当たるようにした（このような小翼はスラット翼と呼ばれている）。スラット翼の伴流による乱れが主翼の剥離を防止するのではないかと考えた訳である。この時、スラット翼は迎角をあまり大きく取らず、スラット翼からキャビテーションが発生しないようにしておく。

写真13・5はNACA0015翼型に、その1/2の大きさのスラットをつけた場合である。一番上の写真のスラット翼なしの場合に比べ、スラット翼をつけると圧力分布が改善され、真中の写真のようにキャビティの長さが小さくなる。さらにスラット翼の伴流が主翼背面の境界層に

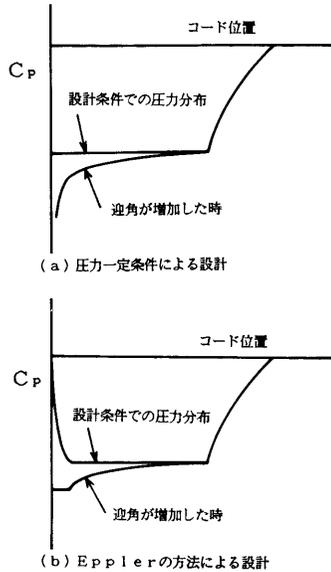


図13・6 翼の圧力分布

当たるように位置を調整すると、圧力分布は真中の写真の場合とあまり変わらないのに、いちばん下の写真のように、シート・キャビテーションはすっかり消えてしまう。

スラット翼はもっと小さくても効果がありそうだし、今はやりの高速水中翼船やプロペラにも利用出来ると思われるが、研究は基礎的な翼型の実験までで中断している。

圧力分布の改善 (82, 86, 87, 103, 106, 124, 127, 143)

もちろん、翼面の圧力分布を改善して、キャビテーションの

発生を減らし、さらに性能の改善をねらう、いわば一石二鳥の工夫は、一番望ましいものである。翼の背面（負圧面）のみに話を限って考えてみよう。従来からあるものは、図13・6(a)にあるように背面の圧力を蒸気圧よりわずかに高い圧力で一定に保つというものであった。しかし状態が少し変わって迎角が大きくなると、翼の先端で圧力が急激に下がって、かえって大きなキャビテーションが発生してしまう。船のプロペラは船尾について

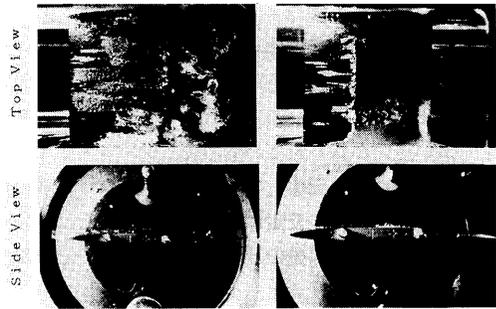


写真13・6 キャビティの様子の比較

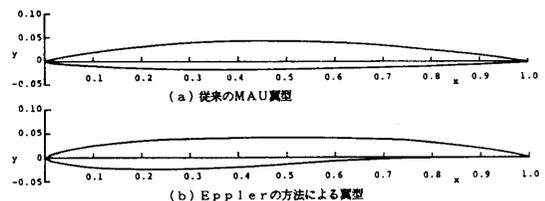


図13・7 新しい翼断面形状

いて、複雑な伴流の中で作動するから、すぐにこういう問題に出くわす。

何かよい方法がないかと思っていると、西ドイツ（当時）のEppler 教授の考えた翼型についての面白い理論にぶつかった。⁽³⁾ 翼をいくつかの部分にわけて、それぞれの部分について圧力が平らになる迎角を決め、それらを加え合わせた特性の翼型が設計出来る。一寸わかりにくいのが、プロペラの翼のようにプロペラ一回転中に、その迎角が変化する場合にはまことに都合がよい。プロペラの設計はかなり複雑になるが、迎角が増加しても図13・6(b)に示すように(a)の場合と違って負圧のピークが出来ない。

ちょうど大学院でキャビテーション理論を考えていた山口君に、彼の理論とEppler 教授の理論を結びつけてもらった。このようにして出来上がった翼は図13・7に示すように前半部がやや厚く翼後縁附近が少しへこんだ形状になった。日本でプロペラ翼断面としてよく使われているMAU翼型と比べると、かなり異なった形状になっている。写真13・6はちょうど新しく完成した3番目のタンネル、船用プロペラキャビテーション・タンネル（前号の写真11・1参照）で両者を比較したものである。上の2葉の写真は上から見たもの、下の写真は横から見たものである。同じ条件でキャビテーションがかなり小さくなっていることが見て取れよう。

この研究はキャビテーションの少ないプロペラの開発へと進み、さらに東大での研究を参考にして、従来のプロペラより効率が高く、キャビテーションによる振動が少ないプロペラが開発され、DW 17,500 tのバラ積貨物船に装着されている。⁽⁴⁾⁽⁵⁾ またいくつかの造船所でこのようなプロペラ設計法を開発中とのことである。

船用プロペラキャビテーション・タンネル (76)

話が前後したが、プロペラ用のタンネルについて述べよう。このタンネルはプロペラキャビテーションの研究になくはならないもので、前号にも述べられているように、昭和54～55年度の2ケ年で建設した。

大学の研究施設なのでプロペラの他に、翼型の実験が出来るように計画し、詳細設計と製作は三菱重工にお願いした。完成後10年以上すぎているが、ほとんどノットラブルで運転時間は16,000時間になろうとしている。プロペラばかりでなく、次に述べるキャビテーションの基礎研究にも、また最近ではスーパーキャビテーションプロペラの開発にも活躍している。

キャビテーションの構造 (111, 120, 121, 133)



写真13・7 キャビテーションの非定常性とクラウド・キャビテーションの発生

キャビテーションがどのように成長し、どのようにふるまい、どのように崩壊して行くかを研究することは、研究のもう1つの大きなテーマであった。キャビテーションの研究は、「キャビテーションの発生によって揚力や抗力がどのように変わるか」ということが長い間主題であった。しかし、船のプロペラでは騒音・振動やエロージョンが問題になることが多いから、単に圧力分布がどのように変化するかというようなことを調べるのでは不十分で、もう少し微細な構造に立ち入って調べなければならない。

翼に発生するキャビテーションを取って見ても、キャビティ長さが小さい内は安定であり変動しないが、キャビティ長さが翼のコード長さの $\frac{1}{2}$ 程度になると流れの条件は定常でも、自励振動的にキャビティの長さが振動してしまう。写真13・7はそのような振動の1周期を示したもので、キャビティの長さが次第に長くなるとキャビティの先端より少し後ろにクビレが出て、2つに分裂し後半分は流れに流され、大きな渦の中に雲のようなキャビテーションがある状態になる。これが最初に述べたクラウド・キャビテーションで、このキャビテーションが発生するとエロージョンが起きたり、高周波の騒音が

船の科学

発生したりするので、注目されている。

まず観察を、というわけで、翼に発生するキャビテーションをストロボ光を使って止めて見たり、高速度シネを取ってクラウドの動きを追跡したり、レーザー流速計でクラウドの中の流速を計ったりした。わかって来たのは次のような構造である。

まず翼の先端（正確には流れの岐点）とキャビティ先端のわずかな部分で、渦（正確には渦度）が発生する。またキャビティの中は混相流なので理論的にはここからも渦が発生する可能性がある。これらの渦は時間的に定常で下流に流れて行かず、むしろある時間、渦がたまり、それが大きな1つの渦として、キャビティの気泡を引きつけて下流に流れて行く。したがってその中心には渦キャビテーションが発生し、まわりを無数の小さな気泡がかこんでいる構造になっている。小さな気泡群が高圧の所つぶれ出すと、ナダレ現象を引き起こし全体が一気につぶれるから、強い衝撃波が発生し、激しく翼の表面をたたく。このようなストーリーである。

ホログラムによる観察 (144, 155)

クラウド・キャビテーションの構造がわかって来ると、クラウドの中にどのくらいの大きさの気泡がいくつぐらあるか計ってみたいくなる。

幸い文部省の科学研究費をいただいたので、ホログラムで計ってみることにした。昭和61年のことである。もうホログラム自身は研究の対象とはならない時なので、工学部中さがしてもやっている人がいない。仕方なく教科書を読みながら、研究室の人達とルビーレーザーの使い方やら、光路のレンズや鏡のセット、乾板の現象の仕方一つ一つ勉強して行った。

ホログラム像を得るにはレーザー光を散乱させるため光路の中にスリガラスを入れなければならない。最初はそんなことにも気がつかず、どうやってもうまく行かず何週間も悩んだりした。スリガラスを入れなければいけないということに気がついても、本当に街のガラス屋で売っているクモリガラス板でよいのか、半信半疑だった。だからホログラム像がちゃんと得られ、計測が出来るようになった時には本当にうれしかった。その後もキャリブレーションはどうするか、沢山の気泡のホログラムをどう調べて行くのか、まだまだ路は遠かった。外の人にお見せ出来るような結果を得るまでに3年かかった。

図13・8はそのような結果の一例である。計測場所は翼のコードの60%付近で、図中の右下がりの線は翼の表面を示している。実はこの図は5,000ヶあまり計測した気泡の内、半径45ミクロンより大きいものだけを選んで

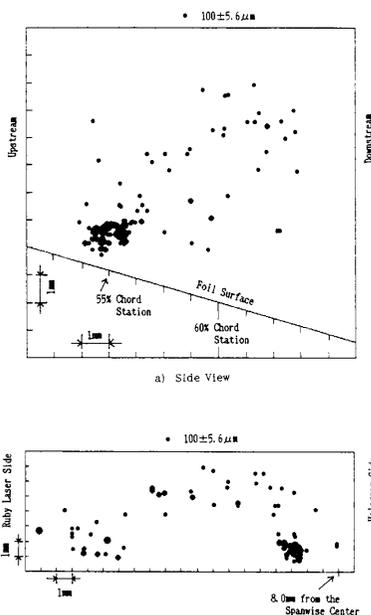


図13・8 ホログラムによる気泡の測定

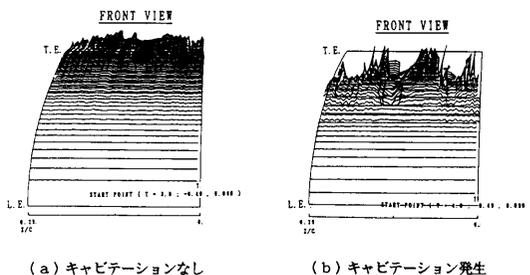


図13・9 キャビテーションによる流れの変化

図にしたものである。上の図は横から、下の図は後から見たもので、気泡は一樣に分布しているのではなく、逆U字型に分布していることがわかる。どうも渦キャビテーションがちぎれてこのような大きな気泡群になるらしい。もっと観察例を増やして行かなければならないと思っている。

クラウド・キャビテーションの理論解析 (110, 123, 132, 138, 141, 142, 146, 157)

写真13・7で見たようなクラウド・キャビテーションを解析するには、非定常な粘性流として取り扱わなくてはならない。従来のキャビテーション理論は、ほとんどが定常な粘性のない流れとして自由流線の理論を応用したものであった。つまりキャビテーションを気膜として考えているもので、これを非定常な粘性流に拡張するの

は難しい。

ここで考えを180度変えて、キャビテーションを気泡流と仮定して理論を組み立てると、キャビテーションの中も外も同じ性質の流れとして取り扱えるので、解析はずっと楽になる。ちょうど大学院にいた久保田君が取り組んでくれた。これは流れを圧縮性のある非定常粘性流として解析するので、NS方程式と気泡群の成長方程式を連立させて差分法で解く。一相の流れに比べ不安定で発散しやすいので、スーパーコンピュータを使ってもかなりの計算時間となる。この理論解析手法によって翼型の上でキャビティが成長し、途中でちぎれ、消滅して行く様子をうまくシミュレートすることが出来た。久保田君はこの研究で昨年造船学会に新設された論文奨励賞(乾賞)の第一回受賞者となり、本誌の昨年(1991年)の11月号に研究内容の解説が出ているので、ここでは詳しくは述べない。

久保田君の計算はコードは3次元だが計算自身は2次元であった。その後、田中君が3次元の計算をしてくれた。図13・9は翼面をななめ上前方から見たもので、キャビテーションがない時とある時の流体の粒子の動きを図示したものである。流れは手前(下方)から向う(上方)へ流れている。キャビテーションがあると大規模な流れの変動が生じていることが計算からも示されている。

このモデルを使えば、キャビテーションを発生しているプロペラも、丸ごと計算出来ることになるので、将来を期待しているが、現在のコンピュータではまだまだ速さも容量も十分でないので、計算出来るレイノルズ数に限りがある。

キャビテーションの研究としては、他にエロージョンの研究、液体水素や酸素などの特殊液体のキャビテーションの研究なども行っているが、説明は省略する。

研究を始めてから20年以上がすぎたのに、わかったことは少なく、わからないことは20年前と変わらないほど多い。何とか20世紀の内にメドをつけて、21世紀の研究者に受け渡したいものだと思っている。

[参 考 文 献]

(1) Arakeri, V. H. and Acosta, A. J.: "Viscous Effects in the Inception of Cavitation on Axisymmetric Bodies". J. Fluids Eng., Trans. ASME, Vol. 95, Ser. I, No. 4 (1973) 519 - 528
 (2) Casey, M. V.: "The Inception of Attached Cavitation from Laminar Separation Bubbles on Hydrofoils", Conf. on Cavitation, IME, Harriot-Watt Univ. (1974) 9 - 16

別表A : 船型研究室関係(補遺)

290) R. Sato, H. Nogami, Y. Shirase, A. Ito, H. Miyata, K. Masaoka, E. Kamal and Y. Tsuchiya : Hydrodynamic design of fast ferries by the concept of super-slender twin hull, Proc. 1st Inter. Conf. on Fast Sea Transportation (FAST '91) Trondheim (June 1991), Vol. 1 523-528.
 291) H. Kawaguchi, H. Miyata, H. Yamato and T. Takai : Full-scale experiments by the first hydrofoil catamaran Wingster 12 "Exceller", Proc. 1st Inter. Conf. on Fast Sea Transportation (FAST '91) Trondheim (June 1991), Vol. 2 1195-1213.
 292) H. Miyata and S. Nishihara : 設計演習 1990, 日本造船学会誌 745 (1991年 7月), 43-44.
 293) H. Miyata : 自由表面をもつ流れのモデリングと数値解析、計測自動制御学会: 流体の計測と制御におけるモデリングと数値流体解析講習会 (1991年10月), 1-10.
 294) H. Miyata, H. Kawaguchi, K. Matsuno, T. Arai, Y. Tsuchiya, T. Shiroeda and Y. Kikuchi : 双胴水中翼実験船の定常直進航走試験、Full-scale experiments of a hydrofoil catamaran on a steady straight course, J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 170 (1991年12月), 15-22.
 295) M. Kanai, T. Koma, K. Aoki, H. Miyata and T. Yamashita : 地面効果を受ける進行物体に働く流体力、Hydrodynamical forces on a moving body in ground effect, J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 170 (1991年12月), 73-81.
 296) H. Akimoto, M. Sugihara and H. Miyata : 波の中を進行する水平円柱の渦運動と流体力、Vortex motions and forces about a horizontal cylinder advancing beneath the waves, J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 170 (1991年12月), 253-263.
 297) H. Miyata : 高速船の開発、Development of high-speed ships, J. Faculty of Engineering, University of Tokyo (A) Vol. 29 (1991), 26-27.

(3) Eppler, R. and Somers, D. M.: "A Computer Program for the Design and Analysis of Low-Speed Airfoils", NASA TM 80210 (1980)
 (4) 中崎正敏他: "新しい設計手法を用いた3翼小翼面積比プロペラに関する研究", 関西造船協会誌第210号 (1986)
 (5) 大阪造船所: "大型船用3翼プロペラに関する研究", 日本造船振興財団研究開発事業報告書 (1987)