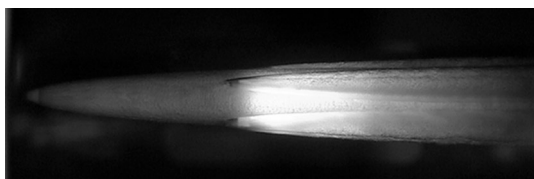


スーパーキャビテーションによる 水中高速航走に関する基礎研究

Basic Research of High-speed Underwater Cruise by Super Cavitation



土屋 繁樹*1
Shigeki Tsuchiya

内堀 洋*2
Hiroshi Uchihori

大島 明*3
Akira Oshima

江口 和樹*4
Kazuki Eguchi

水中航走体を高速化するためには、水による流体抵抗の大幅な低減が必要となる。航走体の胴体部を気層で覆うスーパーキャビテーション状態とすることで、流体抵抗の大部分を占める摩擦抵抗を激減させることが可能となる。当社においても長年にわたり、その技術的可能性を研究してきた。本稿でその概要を報告する。

1. はじめに

水中航走体は、周囲の水の抵抗により、速度が大きく制約される。有人で最も高速な原子力潜水艦で 30 ノット程度、無人で最も高速な水中武器である魚雷でさえ 60 ノット程度が、その速度の上限となっている。

水中航走体の流体抵抗としては、物体後方の圧力が回復しないことによる圧力抵抗と、水の粘性による物体表面の摩擦抵抗に大きく分類されるが、このうち、摩擦抵抗が大きな割合を占める場合が多い。

摩擦抵抗の低減については、古くから研究が行われており、その代表的なものとしては、いわゆる「鮫肌」に由来するリブレットを利用したものや、ポリマーやマイクロバブルを放出するものなどがあり、マイクロバブルの放出については、商用の船舶において実用化に至っている。これらは、同じ速力で摩擦抵抗を低減してエネルギー効率を改善することを目的とする。他方、高速性を追求する場合には、スーパーキャビテーション現象を利用することが考えられる。

スーパーキャビテーション現象は、液体の中において、物体の速度が上昇した際に発生するキャビテーション(気泡)が物体全体を覆うまで発達した状態のことで、高速で水中を航走する物体の先端でスーパーキャビテーションを発生させて航走体全体を気層で覆うことで、摩擦抵抗の大幅な低減が可能となる。

水中航走体への適用例はまだ少ないが、ロシアでは 200 ノットで水中を航走する高速魚雷が実用化されているほか、ドイツや米国でも研究事例があり、水中における飛躍的な高速化技術として着目されている。

当社においても、基礎的な水槽試験から小型の水中ロケットを用いた実射試験までを社内でも研究しており、本稿でその概要を述べる。

2. 水槽試験

2.1 航走体概要

高速で航走する水中航走体をスーパーキャビテーション状態とするには、航走体先端でキャビテーションを発生させる必要がある。一般的にキャビテーションは、突起や段差の後方から発生し

*1 航空宇宙事業本部 特殊機械部 博士(工学)

*2 航空宇宙事業本部 特殊機械部 主席技師

*3 技術統括本部 長崎研究所 主席研究員

*4 技術統括本部 長崎研究所 博士(工学)

やすい。そこで、航走体先端にキャビテータと呼ぶ突起物を配置し、この後端部分からキャビテーションを発生させる航走体形状を試作した。

2.2 水槽試験概要

キャビテーション現象は、キャビテーション数という動圧と全圧の比である無次元係数でその発生状況が決定される。スーパーキャビテーションを発生させるためには、このキャビテーション数を下げる必要があるが、キャビテーション水槽のような実験設備で実現できる低キャビテーション数には限界があり、ボディー全体を覆うスーパーキャビテーション試験を実施することは困難である。

そこで当社では、模擬的なスーパーキャビテーションとして、キャビテータ後方からガスを放出することでスーパーキャビテーション状態を作り出し、抵抗低減効果を確認するという手法を用いた。このような流れは、一般に、Ventilation 流れと呼ばれており、比較的高いキャビテーション数でも、スーパーキャビテーション状態と同様に、航走体を気層で覆うことが可能である。

水槽試験は当社長崎研究所のキャビテーション水槽(計測断面 500 mm²)で実施した。図1に試験状態を示す。計測胴前方・後方に設置した2箇所の観測窓(250mm×800mm)を用い、後方観測窓に分力計を設置し、供試体に作用する抗力を計測する。供試体のスーパーキャビテーション状態の観察は前方窓から行う。

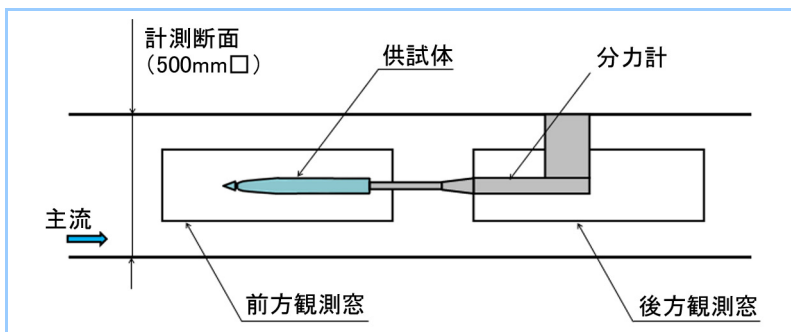


図1 試験状態図

試験は、流速を 9m/s 一定とし、計測胴の圧力と放出ガス流量を変化させて実施した。

計測した抵抗は、次式により無次元の抵抗係数 C_d を算出した。

$$C_d = D / (\frac{1}{2} \rho V^2 S)$$

D : 測定抵抗値, ρ : 水密度, V : 試験流速, S : 供試体胴部断面積

図2及び図3にそれぞれガス放出なし、ありの試験状況を示す。ガス放出により、先端のキャビテータ後方から胴体全体が気層で覆われていることが分かる。放出ガス流量を変化させた試験では、ガス放出により気層が航走体全体を覆うと、抵抗がガス無の状態から激減することが確認できた。また、先端のキャビテータの形状を、様々に変更して抵抗係数に関するデータの取得を行い、最大で約 75%の抵抗低減効果が得られることを確認した。

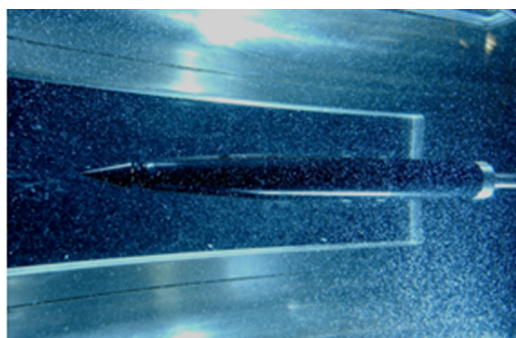


図2 試験状況(ガス放出無し)

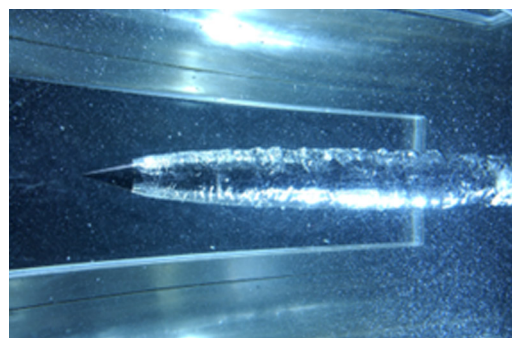


図3 試験状況(ガス放出あり)

3. 運動制御系の検討

3.1 運動モデルの構築

直進性や姿勢制御を検討する場合には、機体軸と垂直方向の流体力と重力を考慮する必要があるが、スーパーキャビテーション航走体の場合、液体と気体の密度差が大きく違うため、液層に接している部分のみの流体力を考慮すればよい。

液層に接している部分の流体力としては、先端に配置したキャビテータが迎角を持った際に揚力を発生する。この流体力は姿勢を不安定化させる方向に働くため、尾部にフィンを設置することにより、釣合いを保たせた。さらに、尾部の流体力としては、迎角が大きい場合には、尾部胴体部分がキャビティ境界面から逸脱し非線形な流体力が加わるため(図4の斜線部分)、この流体力も考慮した。

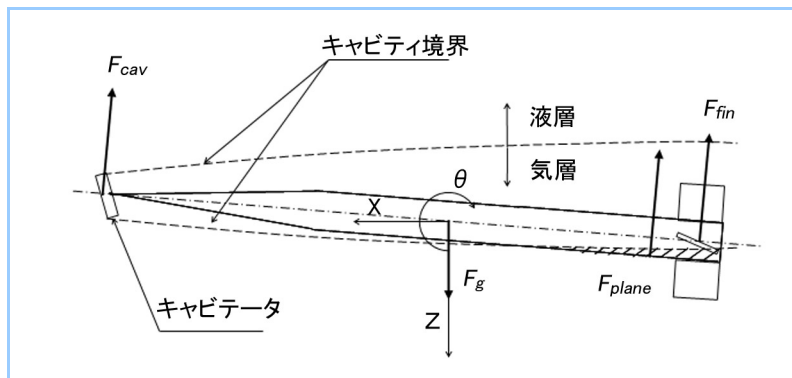


図4 流体力の概略

これらの流体力を理論式で定義し、縦方向におけるピッチ角及び垂直方向速度に関する二自由度の運動方程式を用いて、運動モデルを構築した。なお、進行方向速度は一定とした。

流体力の概略を図4に示す。また、それぞれの流体力を以下に示す。

F_{cav} : キャビテータにかかる流体力

F_{fin} : フィンにかかる流体力

F_g : 重力項

F_{plane} : 尾部胴体部分がキャビティ境界面から逸脱する際にかかる流体力

(図4の斜線部分に作用する流体力)

3.2 シミュレーション結果

3.1 項で構築した運動モデルを用いて、シミュレーションを実施した。前項で述べた非線形な流体力に対し、制御の可能性を検証するため、深度変更運動(目標深度まで潜入後、最初の深度に上昇する運動)を実行した。また、次のステップである発射試験に向けた検討として、直進航走のシミュレーションを実行した。

深度変更運動を実行したシミュレーションの結果、航走体の尾部がキャビティ境界面から逸脱し、非線形な流体力が加わった場合でも、ピッチ面、深度面ともに滑らかに制御できることが判明した。また、無制御で直進航走のシミュレーションを実施することで、次項に示す発射試験(直進航走)に向けた機体諸元に関するデータが得られた。

本検討は、二自由度で流体力をモデル化した結果であり、流体力推定式の精度向上や6自由度における運動モデルの構築などが今後の課題である。

4. 発射試験

スーパーキャビテーション状態での水中航走体の推進装置は、尾部が気層に包まれており、通常のプロペラ推進を用いることができないため、ロケット推進等が必要となる。この水中における

スーパーキャビテーション状態とロケット推進の組合せは、文献などでも事例がなく、当社としても全く経験のない未知の領域である。このため、次の研究ステップとして、小型の固体推進ロケットを用いた水中発射試験として、ロケット推進する供試体の周囲にスーパーキャビテーションを発生させる試験を行い、可視化データを得るとともに、実際の高速度領域における抵抗低減効果を確認した。

4.1 航走体概要

試験実施に当たっては、日油(株)武豊工場内にあるコンクリートで覆われた防爆試験場内において、水槽を有した試験装置を設置し、その内部で試験を行うことで、二重の安全性を確保した。

試験装置の外観を図5に示す。試験装置は水槽側面に観測窓を有しており、ここから高速度カメラにより撮影を行った。供試体は全長約 200mm の小型の固体推進ロケットであり、先端にキャビテータと、尾部に4枚の固定フィンを有した構造とした。また、比較のため、固体推進を内蔵していない供試体による試験も行った。

計測は、高速度カメラを用い、固体ロケットモータの噴射状態及びスーパーキャビテーション発生状況の観察を行うとともに、画像を分析して、速度及び加速度を推定した。

速度としては、100m/s 以上の速力を得ることを目標として実施した。



図5 試験装置の外観

4.2 試験結果

図6に、試験結果の一例を示す。試験装置内においてスーパーキャビテーション・ロケット推進状態で、データ取得が行えることを確認できた。また、高速度カメラで取得された画像から、航走体の移動距離を算出することで速度を推定した結果、目標の 100m/s を上回る速度が得られることを確認できた。

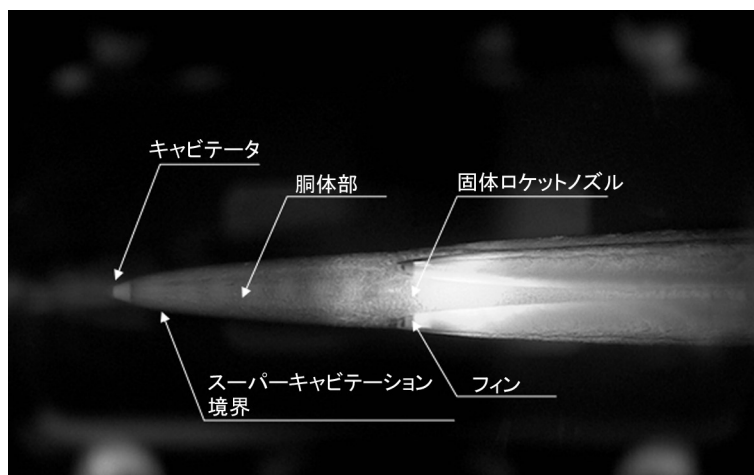


図6 試験結果例

キャビテーションの発生状況としては、先端のキャビテータ後縁からキャビテーションが発生し、胴体部全体を覆うとともに、このキャビティから突出したフィン後方にもスーパーキャビテーションが発生している。また、ノズル後方が一際明るく映っており、固体ロケットモータが正常に燃焼しており、ロケットの排気はキャビテーションと干渉することもなく、キャビティ内部で噴射している。

また、高速度カメラで取得された画像から、速度を複数ポイントで推定し、この変化量から推定した加速度と、陸上試験において事前に取得した固体ロケットの発生推力から、抵抗係数を推定した結果、Ventilation 流れによる水槽試験で得られた結果とおおむね一致しており、水槽試験による抵抗低減効果及び水槽試験手法の妥当性を確認できた。また、固体推進薬を内蔵していない供試体に初速のみを与えた試験を実施した結果、極端に抵抗係数が大きいことが判明した。これは、ロケットの噴射がなく後方の圧力損失が回復しないため、全体の圧力抵抗が大きくなったためと推定される。

なお、全体の航跡としては、今回の試験範囲においては、安定して直進していたが、今回の試験は距離が短いため、直進安定性の確認に関しては今後の課題と考える。

5. まとめ

スーパーキャビテーション現象を利用した水中航走体に関する基礎研究として、キャビテータ形状と抵抗低減効果に関する水槽試験によるデータ取得、運動制御系、直進性の検討、及び、発射試験により、水中ロケット推進と組み合わせた状態で、スーパーキャビテーションによる抵抗低減の効果確認を実施した。

これら一連の研究成果により、ロケット推進スーパーキャビテーション航走技術により大幅な航走抵抗低減が可能となる見通しを得ることができた。特に、スーパーキャビテーション状態でロケット推進により自走させた状態に関するデータ取得は他に例を見ない貴重な成果である。また、スーパーキャビテーションによる抵抗軽減は、水中ロケットに限らず広く応用可能な技術であると考えられ、抵抗軽減効果に関する貴重なデータが得られたと考える。今後、より長大な試験装置を用いる等、スーパーキャビテーションによる高速化に関する研究が継続されることを期待する。

最後に、発射試験に当たっては、(株)神戸製鋼所高砂製作所 特機室、日油(株)武豊工場 研究開発部、(株)ナックイメージテクノロジーの協力のもとに実施した。本稿を借りて謝意を表す。