

氏名	しんたに みつひろ 新谷 充弘
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第919号
学位授与の日付	平成31年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	開水路乱流中に置かれた角錐台の波状表面による抗力の低減
審査委員	(主査)教授 萩原良道 教授 村田 滋 教授 西田秀利

論文内容の要旨

本論文は、物体の表面に波状形状を施して、周囲流れによる物体の抗力を減らすことを目的とし、水流中の波状面を伴う角錐台に関する全抗力・摩擦抗力・圧力の測定と流れの可視化実験を行った。また、直接数値シミュレーションを実行した。得られた結果より、抗力低減とそのメカニズムを明らかにした。

本論文は、全8章から構成されている。第1章は緒言であり、参考文献を紹介して、本研究の背景、目的、意義について述べている。

第2章は、実験装置と角錐台モデルについて詳述している。測定に用いた循環型の開水路の特徴が示されたのち、振幅と波長を5通りに変更した波状形状を表面にもつ角錐台について示されている。

続く3章には、計測法が示されている。第3章には、角錐台モデルを載せた板を支える2個の片持ちはりのひずみの計測値とはりに働く力の較正式を用いて、モデルに働く全抗力を求める方法が示されている。第4章には、水流中のトレーサー粒子の画像を処理して平均速度場を得る方法、および平均速度場をもとに表面近傍の速度分布とせん断応力を算出し、摩擦抗力値を得る方法が説明されている。第5章には、導圧管を用いて角錐台の前面と後面に設けた圧力孔に接続された差圧計により、角錐台前後面の差圧を測定する方法が示されている。

また、第6章は、数値シミュレーション法について述べられている。連続の式とナビエ-ストークス方程式を差分近似して解く方法、および角錐台を表現するための埋め込み境界法が説明されている。

得られた結果とその考察が、第7章に詳述されている。全抗力、圧力抗力および循環流の存在時間割合の実験結果より、角錐台後面の循環流の存在が角錐台の圧力抗力と全抗力の支配因子であることが示されている。また、乱れ強さとレイノルズ応力のシミュレーション結果より、角錐台上面下流側および後面において乱れが強くなることが示された。

第8章は、本論文の結言であり、角錐台を波状表面にすることにより、後流の循環流の変動が促進され、その結果全抗力が減少することが述べられている。

本研究の成果は、省エネルギー技術の発展に寄与することが期待され、工学的に価値が高い。

論文審査の結果の要旨

化石燃料の枯渇や地球温暖化の抑制のために、省エネルギー技術の開発が盛んに行われている。その代表例として、固体が空気や水の流れによって受ける抵抗を減らす技術がある。この技術は、船舶やトラックなどの燃料削減と大気汚染軽減、配管系のポンプ動力削減に大きく貢献できる。しかしながら、研究成果、その実用化は限られており、更なる研究の必要性が求められている。

申請者は、このような状況に鑑み、物体の表面に何らかの波状形状を施して、周囲の水流乱流によって生じる物体の抗力を減らすことを目的として研究を推進した。本論文は、上記目的を達成するため、比較的単純な形状であるが研究例のきわめて少ない角錐台を対象とした。角錐台のサイズは、申請者が所属する企業の主力商品のひとつであるスイミングゴーグルを想定して決定した。また、波状形状は、イルカがとくに水中を高速で泳ぐ際に観察される表皮の変形から着想を得た。これらは、きわめて独創的であり、工学的意義も大きいと考えられる。

本研究において、申請者は実験と数値シミュレーションを実行した。実験においては、高速の乱流水流を実現できる循環型の開水路を用い測定を実施した。発達した乱流水流が得られる位置に検査部を設け、その底面に置かれた基板上に、光造形技術を用いて作成したアクリル系樹脂製の角錐台を固定した。表面が平面の角錐台のほか、振幅を3とおろし(0.06, 0.10, 0.30 mm)に、波長を3とおろし(1.72, 2.86, 8.58 mm)に変えた正弦波状面を施した5つの角錐台を用いた。

乱流水流により角錐台に加わる力は摩擦抗力と圧力抗力であり、それらの合計は全抗力である。計測の手法と精度を考慮して、これらの力を別々に求めた。まず全抗力に関しては、水流の力を受けて角錐台を固定した基板が下流側に移動すると、それを支える片持ちはりになわみが生じる。そのたわみの時間変化をひずみゲージにより測定し、別途得られる較正式を用いて力を求め、密度と主流平均速度を用いて全抗力の時間変化を得た。つぎに、摩擦抗力に関しては、水流中に微小な白色トレーサー粒子を添加し、レーザー光を照射して粒子の散乱光を撮影することにより流れを可視化した。撮影には、高速度・高解像度ビデオカメラを用いて、微小な乱流変動も捉えた。得られた約5万枚の可視化画像をコンピューターに搭載された粒子追跡速度計測ソフトウェアにより処理して、角錐台表面近傍の平均速度分布を求め、その分布から壁面せん断応力を算出し、最終的に摩擦抗力を求めた。最後に、圧力抗力に関しては、角錐台の前面および後面を3等分した領域の中央に位置した圧力孔より取り出した圧力を差圧計により測定した。圧力孔の3つの位置における差圧値より、最小自乗二次式近似を用いて圧力差の分布を表す近似式を得た。この分布をもとに、最終的に圧力抗力値を得た。これらのすでに確立された手法は申請者によって若干改良されており、また誤差の予測も言及されていることから、これら手法は妥当であると判断できる。

本研究において、申請者が実施した直接数値シミュレーションの手法は、以下のとおりである。矩形の計算領域内に、約160万点の格子点を設け、この格子点系を用いて、支配方程式である連続の式とナビエ-ストークス方程式の偏微分項を差分近似して解く方法を採用した。格子間隔は乱流の最小渦のスケールであるコルモゴロフスケールと同程度であり、乱流の予測には妥当である。角錐台内部には流れが無いことを表現するために、埋め込み境界法が採用された。傾斜した前面と後面、および波状面は埋め込み境界法により表現できている。計算機環境の制限のために、流速、角錐台の高さと流れ方向幅は、実験条件と異なるが、無次元量をもちいた定性的比較は妥

当であり、実験で測定が困難な乱流統計量の議論はきわめて有意義である。

計測結果より、全抗力は、表面に波状形状を施したすべての場合において平面の角錐台よりも低下し、とくに、振幅 0.10 mm、波長 2.86 mm の場合は全抗力が約 7.9%減少した。このことは、波状形状を固体面に施すことが、省エネルギー技術開発にとって極めて有効であることを示している。

摩擦抗力は、全抗力に比べてきわめて小さく、波状面の影響も大きくなかった。他方、圧力抗力は全抗力と同様に、表面に波状形状を施したすべての場合において平面の角錐台よりも低下し、とくに、振幅 0.10 mm、波長 2.86 mm の場合に最も低下した。

このような結果の原因を探るために、流れの可視化画像を精査し、角錐台近傍に間欠的に発生する循環流の存在時間割合を求めた。この時間割合が低いほど、循環流による低圧部の影響が少なく、その結果角錐台前面と後面の圧力差が小さくなり、圧力抗力が減って全抗力の値が低くなることを初めて明らかにした。この知見は学術的にも、工学的にも重要である。

循環流の間欠的出現に関連して、乱流統計量の測定結果と数値シミュレーション結果を検討した。その結果、角錐台上面の波状面底部の流れによって角錐台後流の変動が著しくなり、この変動が角錐台後面に沿う流れを弱めるとともに乱れを促進する結果、循環流が存在しにくい状況になることを見出した。この知見もきわめて重要かつ示唆に富んでいる。

このように、本論文によって得られた、表面に波状形状を施すことによって角錐台の抗力が低減すること、その原因は角錐台後面に沿う循環流の間欠性にあることなどの知見は、今後の省エネルギー技術の開発・発展に大いに寄与することが期待できる。

本学位論文の基礎となった学術論文は下記の 3 件であり、いずれも査読つき論文であり、かつ申請者が筆頭著者である。

- [1] Mitsuhiro Shintani and Yoshimichi Hagiwara, Pressure drag and friction drag for truncated pyramids in a turbulent open channel flow, *Journal of Fluid Science and Technology*, vol. 14 (2019), No. 1, Paper No.18-00403 [DOI: 10.1299/jfst.2019jfst0001], pp. 1-17.
- [2] Mitsuhiro Shintani, Kotaro Nakatsuji, Mitsuo Matsumoto and Yoshimichi Hagiwara, Direct numerical simulation on turbulent flow over truncated pyramid in an open channel, *Proceedings of the 3rd Thermal and Fluids Engineering Conference (2018)*, pp. 1849-1858.
- [3] Mitsuhiro Shintani, Mitsuo Matsumoto and Yoshimichi Hagiwara, Direct numerical simulation on turbulent flow over a truncated pyramid with a wavy surface in an open channel, *Proceedings of the 25th International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences*, pp. 1-13 (to appear).