

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

新谷 充弘

本研究は、立体物表面に何らかの波状形状を施すことで立体物の抵抗を最も減らす方法を確立することを目的とする。上記目的を達成するため、比較的単純な形状である角錐台を用い、その表面に波状形状を施したものに関して全抗力測定、摩擦抗力測定および立体物の前面と後面の差圧測定を実施した。また、更なる解明のために、角錐台周辺の流れについて直接数値シミュレーションを実施した。

実験装置は、循環型の開水路を用い測定を実施した。テストセクションを開水路入口から 1150 mm の位置に設けた。外層における主流方向の平均速度 u_e は、1.12 m/s であり、これは一般的な平泳ぎの速度をもとに決定した。流れ方向の開水路入口から計測地点までの距離に基づくレイノルズ数は $Re_x = 1.2 \times 10^6$ であった。

測定で用いた角錐台は、スイミングゴーグルを想定して各サイズを決定した。表面の波状形状は、振幅と波長を 5 通りに変更した。それぞれの波状形状を得る際、波状面の頂部以外の部分を削りとったため、主流方向に対する投影面積は同一であった。全抗力に関して、水流の圧力を受け角錐台が下流側に移動すると、りん青銅にたわみが生じ、りん青銅に取り付けられたひずみゲージに電圧が発生した。この出力信号と較正実験で得られた較正式を用いて全抵抗の時間変動値を算出し、最終的に全抗力値を得た。摩擦抗力に関して、可視化画像の取得システムより得られた画像を PTV 法にて処理した。得られた時間平均速度場より、表面近傍の平均速度分布と壁面せん断応力を求め、最終的に摩擦抗力値を得た。圧力抗力に関して、差圧計測システムを用いて、角錐台の前面または後面を 3 等分した領域の中央に位置した各圧力孔より取り出した圧力を差圧計にて測定した。差圧の時間変動値を算出し、最終的に差圧値を得た。各圧力孔の 3 つの高さ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高さ依存性を表す近似式を得た。この近似式より得られた差圧値を用いて圧力抗力値を得た。

全抗力は、表面に波状形状を施した model 2 - model 6 の全てにおいて表面が平面である model 1 よりも全抗力係数が減少した。特に、波長 $\lambda^+ = 153$ とし、 $a/\lambda = 0.035$ にすることにより最も全抗力係数が低減し、約 7.9% 減少した。摩擦抗力は、波長 λ の値が減少すると、表面付近の循環の流れによって、効果的に摩擦抗力値が減少するが、減少値はわずかであった。圧力抗力は、波長 $\lambda^+ = 153$ とし、 $a/\lambda = 0.035$ にすることにより最も圧力抗力係数が低減し、約 13.7% 減少した。さらに、波状表面の model 1 に対する差におけるモデル依存性は、全抗力係数のモデル依存性と同様であった。したがって、圧力抗力が全抗力に対して支配的であることがわかった。

直接数値シミュレーションの計算領域を各方向に、 $2\pi h \times 2h \times \pi h$ とした。境界条件として、下面の速度成分にはすべりなし条件を、上面の速度成分には、 u, w にノイマン条件を、 v に速度 0 の条件を与えた。支配方程式には、連続の式とナビエーストークス式を用いた。本シミュレーションでは、レイノルズ数を 180 とした。また、角錐台の後縁部が x 方向の中央位置 πh となるように角錐台を配置し、角錐台の高さを 45.9 とした。角錐台の上面の波状形状の値は、壁単位で $a^+ = 1.9$, $\lambda^+ = 53.0$ とした。本研究では、角錐台と流れ場の相互作用を解くために、Immersed boundary 法を用いた。

無次元時間平均速度分布の結果より、上面においては、上面の下流側に行くにしたがい、 u^+ の値は上面が平面または波状の場合のいずれの結果においても、ともに減少した。しかし、波状面の hilltop 部においては、 u^+ の値の減少量は平面と比較すると極めて少ない結果であった。後面においては、上面が平面または波状の場合のいずれの結果においても、後面の表面近傍において、 v^+ が正の値を示した。また、 $y^+ = 45$ 付近で u^+ の値が著しく減少した。この結果より、角錐台の後方に死水域が存在していることが予想される。しかしながら、 u^+ の値が正であり、また、この速度は下流側にいくにしたがい回復することより、死水域は存在しても、領域が小さいことが予想される。各矩形領域の

変動速度強度分布の結果より、上面においては、 $y^+ < 10$ において、平面よりも高い値であった。また、下流側に行くにしたがい、値が増加した。後面においては、両方の結果において、 $y^+ = 45$ 付近の u_{rms}^+ の値が減少した。しかしながら、波状面においては、 u_{rms}^+ の値の減少量は平面と比較すると少なく、さらに、 v_{rms}^+ の値は増加した。先述したように、この領域における u^+ の値が平面よりも減少量が少ないにもかかわらず、平面の u_{rms}^+ の値よりも高い結果であった。したがって、上面の下流側から角錐台後面の流れは大きく変動していることが予想される。レイノルズ応力の結果より、上面の下流側から角錐台後面の上面付近においては、波状表面のレイノルズ応力の値が高かった。これは、この領域の流れ方向平均速度の勾配は急ではないものの、鉛直方向乱れ強さが極めて高いために、レイノルズ応力の生成項 $v_{rms}^{+2} \cdot (\partial u / \partial y)$ が高くなることが原因である。高いレイノルズ応力により、乱れ運動エネルギーの生成項も、平面の場合よりも高くなるため、この領域の乱れ強さは波状面のほうがより高くなる。したがって、この乱れた流れは、この領域および下流域の乱流の非定常化を促進する。上面を波状にすることで、流れの変動を促進する結果は、抵抗低減メカニズムの結果と定性的に一致した。