

論文の内容の要旨

論文題目 表面張力を利用して水面上を移動する微小機械の推進機構

氏 名 杉浦 正彦

生物が地球上に誕生してから 35 億年という長い時間が経っているが、その間に生物の形態は、生活様式に応じて様々な形に変化し、またその形に合わせて運動方法も変化してきた。水中・空中の両方から捕食者に攻撃されるにもかかわらず、現在アメンボのような半水生昆虫が繁栄している。表面張力によって小型の昆虫は水面に捕えられるので、半水生昆虫が簡単に捕食できるということがこのように繁栄している理由のひとつとして挙げられる。もうひとつの半水生昆虫の利点は、体を空中に置くことで抵抗を減らし、脚を用いて推進するため、推進効率が高いと考えられる。このように推進効率が高いと考えられるアメンボを真似て、近年、水上歩行微小機械が開発されている。しかし、いまだに水上歩行微小機械を作る上での明確な設計指針がない。そこで、本論文では脚部に働く上下方向の力を理論解析により、水平方向の力を定常流実験により調べた。また、脚部の断面形状に着目し、どのような断面形状が浮上能力・静安定が高いか、大きい推進力を発生するかを調べた。

水面上で運動する微小機械にとって、その重量を支える上下方向の力が重要であるが、上下方向の力を解析するにあたり、静的な条件で、円柱および角柱に働く表面張力、静圧、浮力による釣り合い式を導いた。この釣り合い式より、水中に完全に没した物体と比べると、水面で表面張力を用いている物体の上下方向の力のはるかに大きいことがわかった。また、サイズが小さくなるほど、表面張力の作用により、浮力だけを用いる場合に比べてこの上下方向の力が大きくなることがわかった。このように表面張力を用いて水面で自重を支えるとき、同じ密度で比較した場合、円柱よりも角柱の方が浮上能力が高いことがわかった。さらに、静安定を比較した場合も、同様に円柱よりも角柱の方が静安定が高く、上下方向において円柱よりも角柱の方が優れていることがわかった。また、サイズの変化にともない、水面上で釣り合うための、表面張力、静圧、浮力の割合は変化するが、これを円柱、角柱、球、立方体についてあきらかにした。

水面上で運動する微小機械にとって、推進力として利用する水平方向の力が上下方向の力とともに重要であるが、この力を定常流を用いてあきらかにした。実験的に得られたデータをウェーバー数と抵抗係数の関係あるいはフルード数と抵抗係数の関係にまとめた結果、水中に完全に没して運動する円柱や角柱と比較すると、水面で表面張力を用いて運動する物体は、水平方向の力はやや少ないことがわかった。円柱と角柱の比較を行うと、ウェーバー数で見た場合、ウェーバー数が 2 より大きくなると、円柱の抵抗係数が一定になるのに対し、角柱の抵抗係数の一部は増加することがわかった。これは、物体を深く沈め

ることによる形状抵抗の増加が円柱よりも角柱において顕著であるからと考えられた。また、フルード数で見た場合、円柱では、フルード数の増加に伴い、抵抗係数がなだらかに減少するのに対し、角柱では、いったん抵抗係数が上昇する遷移領域があることがわかった。このように、ウェーバー数 2 以上あるいはフルード数 2 弱において、抵抗係数が円柱よりも角柱の方が大きいので、定常前進運動においても、円柱よりも角柱の方が優れていることがわかった。また、水面形状が把握できる範囲で、抵抗を表面張力による抵抗と形状抵抗に分離することができた。

さらに、このように表面張力が作用する自由表面のある流体を最適制御を用いて解析できる可能性を示した。

最後に、水上歩行微小機械という点からアメンボの形状と運動について考察を行った。アメンボは脚部に働く大きな上下力を利用して、胴体を空中に支持して、胴体の抵抗を大きく減らし、少ない水平力でも高速が出せること、没水体と比較すると、消費エネルギーが極めて少なくて済むことがわかった。このメリットを十分に生かすためには、脚部が十分に小さい必要があることがわかった。アメンボのもうひとつの利点として、水と空気の密度差を利用することで、脚部の運動が極めて省エネルギーであることがわかった。さらに、表面張力を充分に利用できる物体の大きさではレイノルズ数が小さく、揚力がほとんど利用できず、抗力の利用が主となるので、アメンボの脚部の運動は、この点からも優れた方法といえた。最後に、これらの利点をそのまま生かし、かつ機械的に製作しやすい機構として脚部を回転させながら自重を支えかつ推進力を出す方法を採用した水上歩行微小機械の試作例を示した。