マッコウクジラの脳油説に基づく物質の相変化を利用した 2 段ピストン型体積変化型浮力調整

渋谷 恒 司^{1†}, 井 上 智 隆¹, 河 合 光 太¹
¹ 龍谷大学 理工学部

キーワード：浮力調整装置, 相変化, 水中ヴィークル, 2 段式ピストンメカニズム, 脳油仮説

1. はじめに

現在的水中ロボットや潜水艦において浮力調整に用いられているのは, 主としてバラストと呼ばれるおもりを投棄する方法である. バラストとしては, 海水や鉄球等が用いられている. これらの水中への投棄は海洋汚染につながる. 例えば, ある地域の水をバラスト水として他の地域に排出することは, 排出される地域には存在しなかった生物を運ぶことになる. これにより生態系を乱す可能性があることが指摘されており, 船舶バラスト水問題として認識されている¹⁾.

このような背景の下, 本研究では, 物質の投棄なしに浮力を調節できる装置の開発を目的とした. このような浮力の調整方法としては, モータ等で体積を増加させる方法があるが²⁾, 本研究では, これとは全く異なる方法を提案する. それは物質の相変化に伴う体積変化を利用する方法である. 物質は通常, 固体と液体との相変化において体積変化を生じる. これを浮力調整に利用しようという試みである. この方式は, 海洋学者の Clark によって提唱された, マッコウクジラの浮力調整方法の仮説にヒントを得ている. この仮説では, 脳油と呼ばれるマッコウクジラの頭部にある物質を, 鼻孔に海水を通して冷却・固化し, また, 毛細血管に流れる血液の量を増やすことにより加熱・融解することにより体積変化を生じさせ, 結果として浮力の調節を可能にしているというものである³⁻⁵⁾. これにより, マッコウクジラは中性浮力の調節を行っていると言われている. この方法では, モータを使う方法と比べ音がしないという利点がある.

本研究ではこれまでに, ピストンを使った方法とゴムの伸縮を利用した方法の 2 つについて調べてきた^{6,7)}. 本報告では, 新たに開発した 2 段ピストン方式による浮力調整装置について述べる. また, これまでに固化および融解に用いてきた物質はパラフィンワックスであったが, これも再検討したので報告する.

2. 物質の検討

2.1 選定物質

固化および融解に用いる物質として理想的な物質とは, 融点が高くかつ体積変化量が大きい物質である. 本研究ではこれまでにパラフィンワックスを用いてきた. この融点は約 47℃であり, 密度は液体時で約 $7.7 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$, 固体時で約 $9.0 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ である⁷⁾. これから計算すると, パラフィンワックスの固体から液体への体積変化量は約 17% である. このパラフィンワックスはアクチュエータとしても使えるほど高い圧力にも耐えられることがわかっている^{8,9)}. しかしながら, その融点は高く, 融解させるために必要な熱量も多くなってしまうという欠点があった. また, 漏洩したとき環境汚染につながる可能性がある. そこで, 環境にも優しいと思われる動物性の油脂であるラードとパラフィンワックスとの比較, 検討を行った.

2.2 融点と凝固点

まず市販のラードの融点および凝固点を実験により求めた. 融点測定には以下のような手順を用いた. まずラード 40ml を計量カップに入れ, 冷凍庫で完全に凝固させる. 続いて, 電磁調理器でビーカーに入れた水を温め, その水で凝固させたラードをカップごと湯煎することにより暖めた. そして温度計により 1 秒間隔で温度を計測した. 次に凝固点を計測した. あらかじめ湯煎しておいたラードを冷凍庫に入れ, その際の温度変化を温度計により 1 秒間隔で計測した. その結果ラードの融点と凝固点は約 20℃, 約 18℃であることがわかった.

2.3 体積変化量の測定

次に, ラードの固相と液相における体積変化量を調べた. 実験方法としては, 以下の手順で行った. まず液相における体積は, カップの目盛りから直接読み取った. そして, 質量を計測し密度を求めた. 5 回計測した結果, 液体時の密度は平均で $8.28 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ であることがわかった.

次に固体時の体積計測方法について述べる. まずメスシリンダーに水を 160ml 入れ, この質量を計測した. そして, あらかじめ質量を計測してある凍ったラードをメスシリンダーの中に入れて, 体積および質量を読み取った. それらの

2009 年 10 月 15 日受付 2010 年 4 月 19 日受理

[†] 〒 520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

龍谷大学理工学部機械システム工学科

渋谷 恒司

Tel: 077-543-7444 Fax: 077-543-7457

E-mail: koji@rins.ryukoku.ac.jp

値から、固体時のラードの密度を算出した。実験は5回行った。その結果、固体時の密度は温度によって若干の変化があったが、平均で約 $9.60 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ であることがわかった。これから液相から固相への密度変化を計算すると、約 15.6% である。これは、パラフィンワックスの約 17% と比べ若干小さい。

2.4 速応性実験

図1に示すような、アルミニウムでできた円筒形で、片方にシリコンゴムを貼り付けた装置を製作した。装置の下部にシリコンゴムが貼り付けられており、その伸縮によって体積変化を可能にしている。また、この装置の上部にはペルチェ素子を取り付けられており、これによって加熱冷却が行える。また装置内部にはニクロム線が封入されており、加熱できるようになっている。この装置を用いて、以下の述べる冷却実験を行った。

この装置中にパラフィンワックスまたはラードを $5.40 \times 10^{-2} \text{ kg}$ と水を封入した。 $5.40 \times 10^{-3} \text{ kg}$ のラードとパラフィンワックスで、それぞれ期待される浮力変化を計算すると、以下のようになる。なお、水の密度は $1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、重

力加速度を 9.8 kg/m^3 とした。浮力は、水の密度 $\times$ 重力加速度 $\times$ 物質の体積で求められる。ラードの場合は、

$$\begin{aligned} \text{固体時の浮力} &: 1.0 \times 10^3 \times 9.8 \times 5.40 \times 10^{-2} / (9.60 \times 10^2) \\ &= 5.51 \times 10^{-1} \text{ N} \\ \text{液体時の浮力} &: 1.0 \times 10^3 \times 9.8 \times 5.40 \times 10^{-2} / (8.28 \times 10^2) \\ &= 6.39 \times 10^{-1} \text{ N} \end{aligned}$$

である。期待される最大浮力変化は、両者の差をとり、 $8.8 \times 10^{-2} \text{ N}$ となる。

パラフィンワックスの場合の期待される最大浮力変化は、同様の計算により $9.9 \times 10^{-2} \text{ N}$ となる。

まず、空気中でニクロム線とペルチェ素子を用いて封入物質を完全に融解させる。その後、図2に示すような実験装置に浮力調整装置をつり下げ、ペルチェ素子のみを用いて冷却し、浮力の変化をはりに取り付けたひずみゲージで計測した。ペルチェ素子に流れる電流は約 2.97A になるように調整した。ラードは約 1500s、パラフィンワックスは約 2400s 計測した。

冷却実験の結果を図3に示す。図3においては、実験で最終的に得られた浮力変化量の平均値を1として正規化している。この図3に示すように、ラードは約 600s で最大浮力変化量（すなわち最小浮力）に達しているが、パラフィンワックスは約 1600s ほどかかっており、ラードの方が早く体積変化を生じることがわかった。

(a) 写真

(b) 模式図

図1 実験機の写真と模式図

図2 実験装置概略図

図3 パラフィンワックスとラードの浮力変化

3.2 段ピストン方式による装置

2. において述べたように、ラードは速応性の面で良いのだが、体積変化量としてはパラフィンワックスよりも若干小さいことがわかった。そこで、以下に述べるような2段ピストン方式により、体積変化量の増加を実現した。

図4にその写真と概略図を示す。この装置は、図1で示した装置のピストンの下部に、2段式のピストンをつなげた形になっている。ピストンにはOリングによりシーリングしている。ピストンの直径は、小さい方で30mm、大きい方で60mmとなっており、直径を2倍にすることにより、体積変

(a) 装置の写真

(b) 装置概略図

図4 2段ピストン式装置の概略図

化量を4倍近くにまで増加させることをねらった構造になっている。

4. 実験

図4の装置を用いて以下の実験を行った。なお、実験は、装置のピストン以外の部分を断熱材で覆った場合と、覆わなかった場合の2通りで行った。装置内には、ラード $5.40 \times 10^{-3} \text{ kg}$ と水が封入されている。この場合、約 $8.8 \times 10^{-2} \times 4 = 3.5 \times 10^{-1} \text{ N}$ の浮力変化が期待される。

4.1 冷却実験

図4の装置を用いて冷却実験を行った。実験方法は、2.4で述べた方法と同じである。まず、空気中で加熱しラードを完全に融解させる。図2のように装置を水中に沈め、浮力変化を測定した。その結果、断熱材で覆わなかった場合と覆った場合で、それぞれ理論値の91%、99%の浮力変化が得られた。一定になるまでの時間は約1500s程度であった。

4.2 加熱実験

次に、加熱時の浮力変化を測定した。装置を冷凍庫に入れてラードを凝固させる。その後図2のように装置を水中に沈め、浮力変化を測定した。その結果、断熱材で覆わなかった場合で理論値の約48%、断熱材を塗布した場合で理論値の約65%程度の浮力変化があった。また、時間は約500s程度で一定となっていることがわかった。

5. 考察

5.1 ラードについて

ラードはパラフィンワックスと比べ速応性および融点の面でメリットがあることがわかった。また、ラードは自然の物質であるため、パラフィンワックスに比べ、環境に対して優しい物質であるといえる。融点が低いということは融解時に少ない熱量で装置を稼働できることになる。また、融点が低ければ、比較的暖かい地方でこの装置を用いた場合、ラードは融解していることになる。これは、装置が故障した場合は浮き上がってくることを意味しており、フェールセーフな装置とすることができると言える。しかしながら、今回のラードの融点と凝固点は約20℃であり、完全にフェールセーフにするためには、さらに融点が低く、体積変化量の大きい物質の探す必要があるだろう。また、ラードは自然な物質であるが故に製品間のばらつきも大きいと考えられるので、今後はこのばらつきについても検討する必要があるだろう。

5.2 2段ピストン方式

2段ピストン方式においては、今回の実験では、理論値の、断熱した場合の加熱時で約65%、冷却時で90%以上の浮力変化を実現できた。値の悪かった加熱時でも、断熱した場合で、2段ピストン方式を利用しない場合の理論値である $8.8 \times 10^{-2} \text{ N}$ の約2.5倍の浮力変化が得られた。加熱時が理論値よりも低いのは断熱が十分ではないためと考えられる。特に

ピストンの部分には断熱を施していないためこの部分の断熱が必要になってくると考えられる。

また、ピストンの面積が大きくなるということは、外部からの力がそれだけ大きくなり、ピストンとシリンダー間の摩擦力も大きくなる。このため、特に水深が大きい場合、結果として得られるピストンの移動量が小さくなると考えられる。このことから、4 倍の浮力変化量を得るには、より多くのエネルギーをラードに作用させる必要があると考えられる。今回の実験では与えるエネルギーをコントロールしなかったが、今後、系に与えるエネルギーをコントロールした実験を行い、検討を進める必要があると考えられる。

なお、ラードは 16% 弱の体積変化なので、この延長線上で実現可能性があるかどうか検討する必要がある。これに対しては、ラードの封入量を増やす、装置の数を増やすなどして対応は可能であると考えられるが、使用エネルギーが増加してしまうことが一つの問題点として挙げられる。

6. 結言

本論文では、2 段ピストン方式による、新たな浮力調整装置について述べた。その結果、パラフィンワックスよりもラードが速応性の面で優れていることが明らかになった。また、2 段ピストン方式により、体積変化が増幅されていることも確認できた。今後はこの方式を用いた水中ロボットを製作し、その有用性を明らかにしていきたいと考えている。その際、現実的なロボットにおいて十分な浮力変化を起こすことができるかどうかを十分検討したい。また、物質の熱伝導や熱伝達の理論的なアプローチも行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 池上武男：船舶バラスト水問題とは，日本航海学会誌，145, 4-12, (2000).
- 2) 山本喜多男，佐々木学，細谷徳男，熊谷道夫，二階堂義則，浦環：無人潜水機およびその位置保持制御方法，特許公開 2001-247086, (2001).
- 3) M.R. Clarke.: Structure and proportions of the spermaceti organ in the sperm whale, J. Mar. Biol. Ass. U.K., 58, 1-17, (1978).
- 4) M.R. Clarke.: Physical properties of spermaceti oil in the sperm whale, J. Mar. Biol. Ass. U.K., 58, 19-26, (1978).
- 5) M.R. Clarke.: Buoyancy control as a function of the spermaceti organ in the sperm whale, J. Mar. Biol. Ass. U.K., 58, 27-71 (1978).
- 6) Shibuya, K., Kado, Y., Honda, S., Iwamoto, T. and Tsutsumi, K.: Underwater Robot with a Buoyancy Control system Based on the Spermaceti oil Hypothesis, Proc. of IEEE/RSJ, Int'l Conference of Intelligent Robots and Systems, 3012-3017, (2006).
- 7) Shibuya, K. and Kawai, K.: Development of a New Buoyancy Control Device for Underwater Vehicles Inspired by the Spermaceti Oil Hypothesis, Advanced Robotics, 23(7-8), 831-846, (2009).
- 8) 壁井信之，小須田昌之，鏡淵英紀，田代良一，水野均，植田康弘，土屋喜一：パラフィンを用いた熱膨張形マイクロアクチュエータ（直動形アクチュエータの試作と基本性能の検討），機論（C 編），62(604), 4624-4629, (1996).
- 9) 壁井信之，小須田昌之，田代良一，水野均，植田康弘，土屋喜一：パラフィンの相転移を利用したマイクロアクチュエータ（手術用切断機構付アクチュエータの試作），機論（C 編），65(629), 192-197, (1998).

Development of a Buoyancy Control Device with Two-Step Piston Mechanism Utilizing Phase Change of Material Based on the Spermaceti Oil Hypothesis

Koji SHIBUYA^{1†}, Tomotaka INOUE¹, Kota KAWAI¹
¹ Ryukoku University

Abstract In this paper, we propose a new buoyancy control device utilizing the phase change of material between liquid and solid states. In general, when solid material is heated above its melting point, the material melts and changes to a liquid state having a larger volume. This causes an increase in buoyancy. One hypothesis claims that sperm whales change their buoyancy based on the same principle. We have already developed a buoyancy control device utilizing rubber stretch to change a volume. In this paper, we build another device based on the same principle with a two step piston mechanism. First, we investigated which material is suitable for this device and find that lard oil is more suitable than paraffin wax, which was used in the previous version of the buoyancy control device. Then, we build a buoyancy control device with the mechanism and confirm its usefulness through experimental results.

Key Words: Buoyancy control device, Phase change, Underwater vehicle, Two-step piston mechanism, Sperm oil hypothesis

Received Oct 15, 2009 Accepted Apr 19, 2010

[†] Koji SHIBUYA

Dept. of Mechanical and Systems Engineering Faculty of Science
and Technology Ryukoku University

1-5, Yokotani Seta-Oe, Otsu, Shiga, 520-2194, Japan

Tel: 077-543-7444 Fax: 077-543-7457

E-mail : koji@rins.ryukoku.ac.jp