マッコウクジラの脳油仮説に基づく浮力調整装置を有する水中ロボットの試作

Development of an Underwater Robot with a Buoyancy Adjusting System Based on the Sperm Oil Hypothesis

○正 渋谷 恒司 学 門 裕一 本田 卓
正 岩本 太郎 正 堤一義

Koji SHIBUYA, Yuich KADO, Suguru HONDA, Taro IWAMOTO, and Kazuyoshi TSUTSUMI
Dept. of Mechanical and Systems Engineering, Ryukoku University
koji@rins.ryukoku.ac.jp

There is a hypothesis that insists that sperm whales melt and congeal sperm oil in their head to adjust their buoyancy. This paper describes an underwater robot with a buoyancy adjusting system based on the sperm oil hypothesis. First of all, we chose paraffin wax as a substitute of real sperm oil and measured its buoyancy increase between liquid and solid states. Paraffin wax's melting point is relatively low and its volume difference between liquid and solid states is large. Then, we designed and developed an underwater robot. Six syringes filled with paraffin wax were installed in the robot and the wax was heated by nichrome wire to melt it. We measured robot's buoyancy increase and succeeded in making the robot surface and change its posture.

Key Words: Sperm oil, Underwater robot, Paraffin wax, Surfacing, Posture control

1. はじめに

マッコウクジラは、その頭部に脳油 (sperm oil) と呼ばれる物質を有している^[1]。この脳油の役割については諸説ある。例えば、雄同士の間において武器として使われる^[2]、バイオソナーとして用いられている^[3]、などの仮説が提唱されている。これらに対し、Clarke は 1978 年に、脳油は浮力調整に用いられているという説を発表した^[4]。これは、脳油を固化・融解して体積を変化させ、それにより浮力を調整しているという説である。これがマッコウクジラの深海への潜水能力の一因であるとも言われている。

本研究では、この脳油の浮力調整説に着目し、この原理を応用した水中ロボットの製作を目指すこととした。この体積変化を利用した浮力調整は、例えばバラストを消耗しないなどの利点があると考えられる。

本研究ではこれまで、その原理を検証し、実際に浮力調整装置として応用が可能であることを示した^[5]。研究の次のステップとして、この原理を応用した水中ロボットを製作し、浮上、姿勢制御の実験を行った。本報告では、脳油の代わりとして用いたパラフィンワックスの浮力実験、製作したロボット、およびそれによる浮上・姿勢制御実験の結果について述べる。

2. パラフィンワックスの浮力増加実験

脳油は約 29°C で固化、33°C で融解し、その密度は、液体時約 0.95g/cm³、固体時約 0.82g/cm³ であると言われている。脳油に代わる物質としては、パラフィンワックスを用いた。その融点は約 47°C、固体時と液体時の密度はそれぞれ 0.900g/cm³ と 0.768g/cm³ である。このことから、100g のパラフィンワックスに対し、固体から液体で約 0.19N の浮力増加が見込まれる。

パラフィンワックスの体積変化による浮力増加が実際にどのくらいであるかを、実験により調べた。まず図 1 のように風船にパラフィンワックスを 100g と nichrome 線を封入した。nichrome 線は、図 2 に示すように、3 種類の形状とした。パターン A は数回曲げただけの状態、パターン B は風船の口に

近い方に nichrome 線を寄せた状態、そしてパターン C は nichrome 線を螺旋状にして、風船全体に行き渡るようにしている。これらの風船と、ひずみゲージを貼った梁、および浮力調整用のおもりを糸でつないだ。そして nichrome 線によりワックスを加熱・融解し、浮力の増加をひずみゲージにより計測した。その結果、パターン A で約 0.065N、パターン B で約 0.10N、そしてパターン C で約 0.14N の浮力増加があった。このように、nichrome 線の配置の仕方によって最終的な浮力に差が出てくることがわかった。また、浮力増加の理想値で

Fig. 1 Experimental setup of buoyancy measurement

Fig. 2 Schematic diagram of nichrome wire arrangement patterns

Fig. 3 Photograph of the robot.

Fig. 4 Robot's buoyancy increase

ある 0.19N の約 74%の浮力が得られることがわかった。

3. ロボットの設計・製作

以上の結果をふまえ、水中ロボットを設計・製作した。図3に今回製作したロボットを示す。ロボット下部が浮力調整装置であり、6個のシリンジが用いられている。1個のシリンジには、85gのパラフィンワックスと、螺旋状にしたニクロム線を封入した。ピストンにはばねを取り付け、固化した場合スムーズにピストンが戻るようにしてある。

ロボットの上部は、アクリルパイプとアクリルドームでできている。この中に制御回路、電源であるバッテリーを搭載した。また、水中モータを左右それぞれ一個ずつ、計2個用いた。制御信号は無線によって行われるため、このロボットは自立的に行動可能である。

ロボットの全長は約400mm、全高は約235mmである。また、その質量は浮力調整用のおもりも含め、約8.2kgである。

4. 実験

4. 1 浮力実験

このロボットにより、どの程度の浮力増加が得られるかを実験により計測した。計測方法は2章で述べた方法と同様である。6本全てのシリンジを同時に加熱し、浮力の増加を計測した。計測結果を図4に示す。図4は5回計測したそれぞれの結果を示している。このように、ロボットの浮力が増加していることが確認できた。最終的な浮力増加の平均値は約0.60Nであり、1本のシリンジ当たり0.10N浮力が増加して

Fig. 5 Photographic series of pictures of robot surfacing

いることを示している。2章の結果から、85gのパラフィンワックスに対して約0.12N (0.14Nの約85%)の浮力が期待できるが、この値よりもやや小さかった。この原因としては、ピストンとシリンジの間の摩擦、パラフィンワックスが溶けきっていないなどの理由が考えられる。なお、最終的な浮力に到達するまで、いずれも約1500秒程度かかった。

4. 2 浮上実験

次に、実際に浮上することができるかどうかを確認した。水槽の底にロボットを置き、6本のシリンジを同時に加熱した。その結果、図5に示すように浮上することが確認できた。加熱開始から浮上を始めるまで約8分かかり、浮上開始からcm上の水面に到達するまで、約26秒かかった。

4. 3 姿勢調整実験

次に、全てのシリンジを同時に加熱するのではなく、加熱するシリンジのパターンを変えることにより、姿勢調節ができるのではないかと考え、実験を行った。この実験では内部のバッテリーではなく、直流電源を用いた。図6に6本のシリンジの加熱パターンを、図7にその結果得られた姿勢を示す。パターンAは前3本のシリンジを、パターンBでは横2本のシリンジを、パターンCでは、パターンBに加えてもう一本前のシリンジを加熱した。

図7に示すように、パターンAではピッチ角を、パターンBではロール角を、パターンCではピッチ角とロール角を両方生成できていることが確認できる。

5. まとめ

本報告では、マッコウクジラの脳油説を基にした浮力調整装置を有する水中ロボットの製作とそれによる実験について述べた。今回の実験は十分にこの装置の有効性を示したと言

Fig. 6 Heated syringe patterns

(a)Pattern A

(b) Pattern B

(c) Pattern C

Fig. 7 Robot postures for each pattern

える。今後は、今回付加することができなかった冷却装置について検討する予定である。また、熱をより有効に使うために、断熱を考えた設計にする、加熱時間を抑えるために加熱方法を見直すなどのことが挙げられる。

参考文献

- 1)加藤秀弘, "マッコウクジラの自然誌", (株)平凡社, 1995.
- 2) D. R. Carrier, S. M. Deban and J. Otterstorn, "The face that sank the Essex: potential function of the spermaceti organ in aggression," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 205, pp. 1755-1763, 2002.
- 3) NORRIS, K. S. und G. W. HARVEY, "A theory for the function of the spermaceti organ of the sperm whale (*Physeter catodon* L.)," *Animal orientation and navigation. NASA spec. publication*, S. 397-417, 1972.
- 4) Clarke, M. R., "Buoyancy control as a function of the spermaceti organ," *J. Mar. Bio. Ass. U.K.* 58, 27-71, 1978.
- 5)門裕一, 渋谷恒司, 岩本太郎, 堤一義, "マッコウクジラの脳油を参考にした浮力調整装置の試作", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 05, 2P1S-008, 2005.