

投げ込み型海洋センサの沈降条件に関する検討

田中 聡* 松原 翔人*

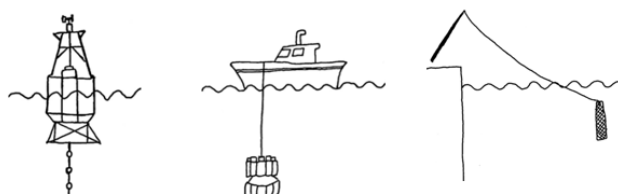
A Study on Subsidence Conditions for the throw in type CTD.

Satoshi Tanaka, Shoto Matubara

Abstract In this research, we aim to develop a throw in type seawater sensor that can easily observe the ocean from various places such as the coast or on a ship using a fishing tackle. The throw in type CTDs currently on sale are not suitable for long throws due to their large mass. In addition, since the sedimentation velocity is fast, it is impossible to observe a precise temperature profile. In order to solve this problem,

1. はじめに

海洋観測には CTD センサ(Conductivity Temperature Depth Sensor) が広く用いられている。CTD センサには Fig.1 のように(a)定置型, (b)投下型, (c)投げ込み型など種類が実用化されている。定置型は海上のブイにつりさげ、あるいは、錨やアンカで定点に固定して用いる。通信機能がありリアルタイムで情報を衛星などに送信することができる。投下方式は船などで観測現場に移動して測定点で海中に投下する。任意の場所を測定できるが、移動の手間がかかり観測はリアルタイムではない。投げ込み型は釣り竿などを用いて船や沿岸、いかだから投げ込むことで観測ができるため、漁業などの仕事の合間に観測することができる。リアルタイム観測には十分とはいえないものの、多点観測には向いているといえる。特に潮流の早いところでは他の方式の運用は難しく、投げ込み型では使い方を工夫することで観測範囲を広げることができる。



(a) Stationary (b) Drop in (c) Throw-in

Fig.1 The types of CTDs for marine sensing.

2. センサの沈降速度

CTD による観測では、たとえば海水温の垂直プロファ

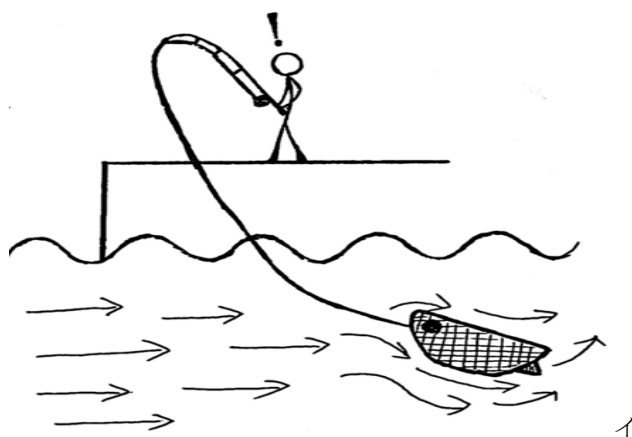


Fig.2 The throw in sensor in rush current.

イルを正確に測定するためには沈降速度が遅く、速い流れに対応可能な形状であることが求められる。また、早い流

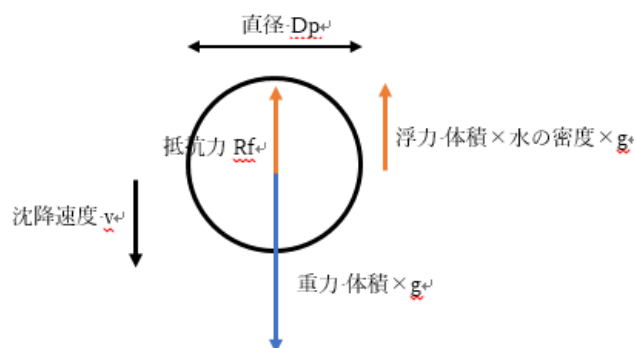


Fig.3 Force of sphere body.

れに流されて浮沈をくりかえすことが少ない構造も必要となる (Fig.2)。

温度センサの性能の一つは周囲の温度に対する応答速度 (熱時定数) であるがサーミスタを用いたもので 1 秒程度) とされているが、より小型の熱電対を用いて 0.5 秒程度である。温度測定の測温精度と応答速度は相反関係に

あるため、熱時定数の低いセンサで水温変化の大きい境界面を通過する場合には予測測温の機能が求められる。

海中におけるセンサの沈降速度の理論値を計算するために、センサの形状は直径 $D_p[m]$ の球形であるものとした。Fig.3 には、球形の物体が非圧縮性媒質の中に速度 $v[m/s]$ で沈降していくときの力の関係を示す。図より運動方程式は、水の密度を $\rho_w[kg/m^3]$ 、物体の密度 $\rho_s[kg/m^3]$ は一様として次の式で表される。

$$m \frac{dv}{dt} = mg - mg \frac{\rho_w}{\rho_s} - R_f \quad (1)$$

右辺はそれぞれ、第1項が重力、第2項が浮力、第3項が抵抗力を表している。

物体が水中で流れを乱さずに静かに沈降するとき、(1)式の時間微分を0とし、水の粘性率を η とすると、沈降速度（終端速度）の一般式は次の式ようになる。

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{18\eta} D_p^2 \quad (2)$$

ここで、沈降速度 v は物体の直径 D_p の2乗に比例していることから、沈降速度に最も大きく影響を与えるのは「物体の直径」であると考えることができ、この関係を Stokes の法則と呼んでいる。この時の物体に作用する抵抗力 R_f は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} R_f &= C_d \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \rho_w \frac{v^2}{2} \\ &= \frac{24\eta}{dv\rho_w} \pi \frac{d^2}{2} \rho_w \frac{v^2}{2} \\ &= 3\pi\eta dv \end{aligned} \quad (3)$$

となる。式(2)を用いて物体の沈降速度を求めることが可能だが、この式では物体の直径が大きくなると沈降速度が明らかに異常な値となってしまう。これは、物体の直径が大きくなると、ストークスの法則の前提条件である静かな沈降でなくなるからであり、抵抗係数の近似が成り立たないためである。流れの乱れはレイノルズ数で表現

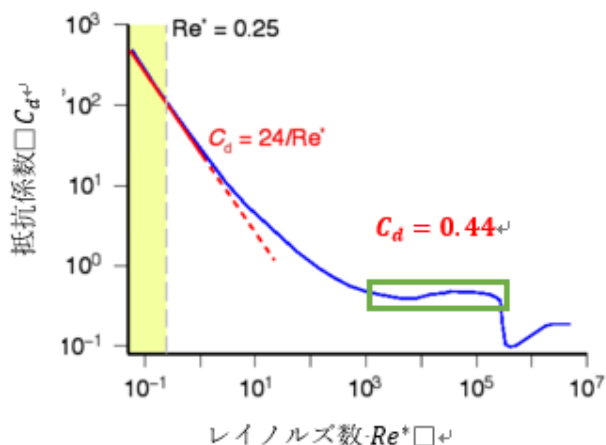


Fig.4 Relation between spherical object, Reynolds number and Resistance coefficient.

されるが、沈降する物体のレイノルズ数と抵抗係数は Fig.4 のような関係がある[2]。

Fig.4 より、レイノルズ数が $10^3 < Re^* < 10^5$ のとき、球体の抵抗係数 C_d は約 0.44 であり、式(1)(3)に適用すると、以下のような終端速度の式になる。

$$v = \sqrt{\frac{3(\rho_s - \rho_w)gD_p}{\rho_w}} \quad (4)$$

これは沈降速度が物体の直径の 1/2 乗に比例していることがわかる。この法則をインパクト則と呼ぶ。一般的に物体の直径が 2mm 以上のものに適用される。その一方で、遷移域 ($1 < Re^* < 10^3$) における抵抗係数 C_d の近似式は以下

Fig.3 Subsidence model of a spherical object..

$$C_d = \left(0.55 + \frac{4.8}{\sqrt{Re^*}}\right)^2 \quad (5)$$

この式を(1)(3)に適用して、繰り返し法により終端速度 v を求める。

3 節での計算では終端速度の結果に合わせて、(4) (5) の式を使い分ける。

3. フLOAT 付きのセンサの沈降速度

球形物体の沈降速度の計算結果は次の節で示すが、沈降速度のコントロールがかなり難しいことが分かった。また、方形や半球などの異なる形状についても計算したものの、沈降速度についてはあまり変化がみられなかった。

そこで Fig.5 のような発砲スチロール製のフロートを取りつけた場合の球形物体の沈降速度についても検討した。

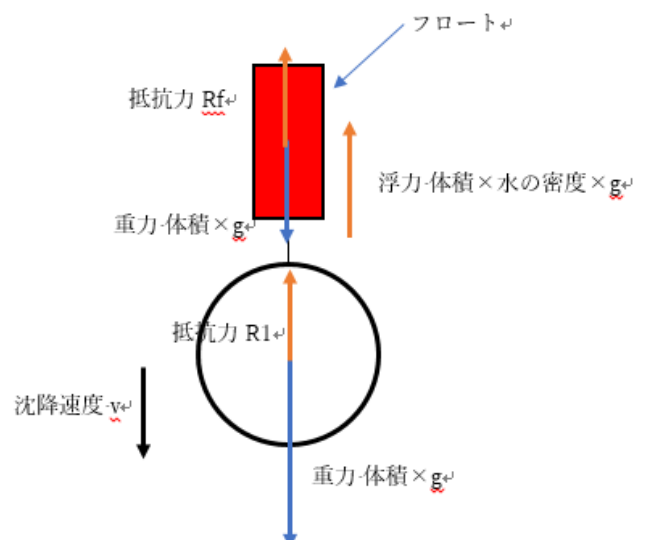


Fig.5 Mechanical equilibrium of the spherical objects with floats.

球体の運動は以下の式で表される。

$$m_1 \frac{dv}{dt} = m_1 g - m_1 g \frac{\rho_w}{\rho_s} - R_1 - F_f \quad (6)$$

また、フロートの運動は以下の式で表される。

$$m_f \frac{dv}{dt} = m_f g - m_f g \frac{\rho_w}{\rho_f} - R_2 + F_f \quad (7)$$

2つの式を加算すると、

$$(m_1 + m_f) \frac{dv}{dt} = m_1 g \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) + m_f g \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_f}\right) - R_1 - R_2 \quad (8)$$

となる。定常状態において $\frac{dv}{dt} = 0$ となる。

抵抗 R は、球体の直径 D_p [m] とすると、

$$R = 3\pi\eta D_p v \quad (9)$$

停止している球形物体に速度 v の流れが与える抵抗力 R を運動エネルギーの観点から見ると、

$$R = C_d \times \left(\frac{\pi D_p^2}{4}\right) \times \left(\frac{\rho_w v^2}{2}\right) \quad (10)$$

となる。球体のレイノルズ数は、直径 D_p を代表長さとして、

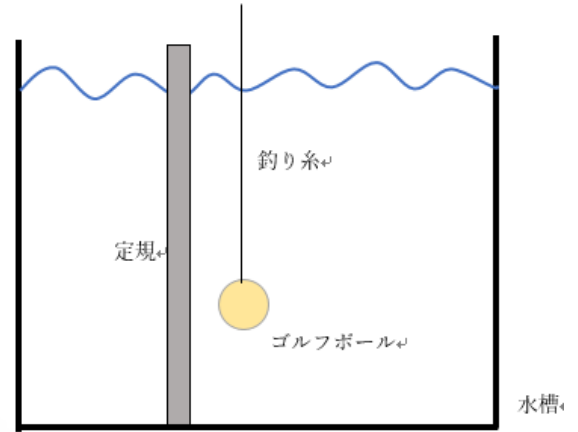
$$Re = \frac{v D_p \rho_w}{\eta} \quad (11)$$

となる。水の粘性係数 $\eta = 101.6 \times 10^{-5} \text{ P} \cdot \text{s}$ である。

4. 実験

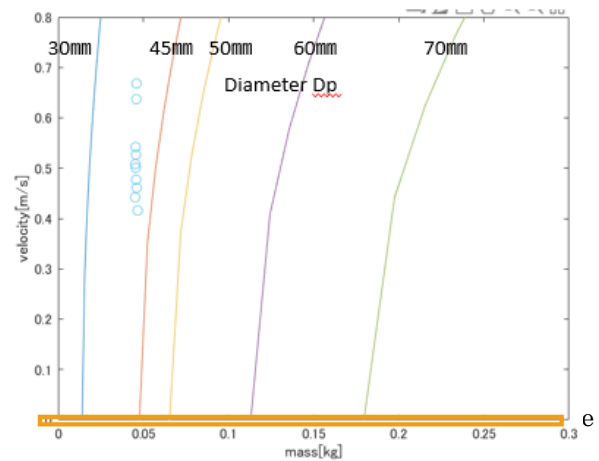
ゴルフボールを用いた淡水の中で沈降実験を行った。Fig.6 のように深さのある水槽に釣り糸をつけたゴルフボール沈めてビデオカメラでその位置を撮影する。ゴルフボールは直径 42.7mm であるが、比重 1.1~1.14 まで、すこしずつ質量の異なるものを 10 個選別した。ゴルフボールを沈下させる際に、釣り糸による張力が働かないように糸送りに注意しながら、真上から沈下させた。撮影した動画をコマ送りし、10 コマ分で沈下した距離を記録した中から 3 回の平均値をゴルフボールの沈下速度とした。動画記録の各フレームにおいて移動間隔は少しずつ異なり、増速、減速を繰り返しているとみられるものの、平均値をとって終端速度とした。

実験結果と理論値の計算結果を Fig.7 に示す。同図の横軸はゴルフボールの重さであり、縦軸は終端速度（沈降速度）である。理論値で描かれる線上はボールの大きさは変わらないが比重が変化することを意味する。比重が大きいほど沈降速度が速く図の上側に現れることになる。



ビデオカメラ

Fig.6 Experiment of submerging a golf ball in an large aquarium.



実験値は 42.7mm の線に沿っており、およそ理論が正しいといえるが、比重が重いものについては理論より速度が速いと言える。ゴルフボールの表面には空気抵抗を減らすためのディンプルが刻まれており、水中においても速度が大きくなれば抵抗を減らす効果が表れているものと考えている。

つりざおを用いて遠投を行う場合、実用上はおもり部分の質量は 150g 以下であることが経験上知られている。この点を Fig.7 にあてはめると、球の直径は 60mm 以下でなければならないといえ、実際にセンサはコンパクトにまとめる必要がある。また、沈降速度を 0.5m/s 以下にするためには比重を 1 にかなり近づける必要があり、海水温や気温の変化で沈降速度が大きく変わるなど制御が難しいと考えられる。

次に比重 0.0328 の発泡スチロールを釣り糸でとりつけたフロート付きのゴルフボールの沈降実験を行った (Fig.8)。実験結果と理論値を Fig.9 に示す。フロートな

しに比べて5分の1の速度となり目的にかなう結果となった。ほぼ理論値に近い値が得られたが、フロートが小さい場合の速度が理論値よりかなり小さくなるという結果となっている。小さいフロートではフロートが糸にひかれて水中で揺れることから糸の周辺の水がかき乱されてレイノズル数がより大きくなっていると考えている。

このようにフロートを用いることにより沈降速度の制御が容易になることが理論及び実験により示された。

5. まとめ

開発中のセンサ基板を Fig.10 に示す。Raspberry Pi Pico をベースとしたデータロガーとワイヤレス給電システムを搭載する。バッテリーを含めて 65 g となっておりプラスチック外装容器を含めて 100g, 直径 5cm 以内に収まることを目標としている。投げ込み時の衝撃に耐えるような強度が必要となるため耐水性脳と同時に衝撃への柔軟性のある外装材料を用いる。実験に用いたようにフロート部分を糸でつなぐのか、外装の一部として張り付けるのかはこれから検討を行う。

構造的な制約から、蓋をあけて電池交換やデータの取り出しをすることは難しいためワイヤレス給電および無線データリンクを用いて取り出しを行う。

6. 参考文献

- [1] 松原 翔人, 田中 聡: “流れのある海域に使用する投げ込み型温度センサの挙動解析”, 第 31 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 1B-5, pp.19-20, 2022 年 11 月 26 日.
- [2] 森川 敬信他: “流れ学”, 朝倉書店, 1993 年.

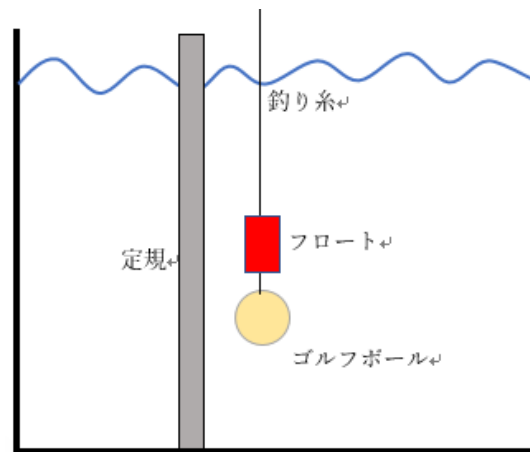


Fig.8 Experiment of submerging a golf ball with float.

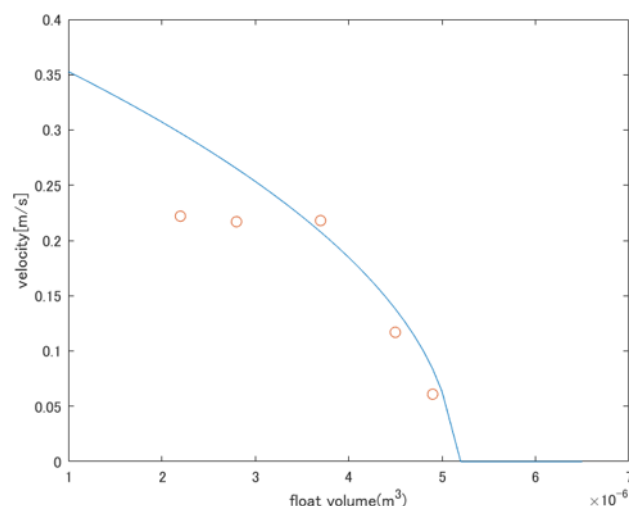


Fig.9 Submerging velocity vs float volume. Experimental result (Circle) and calculate result.

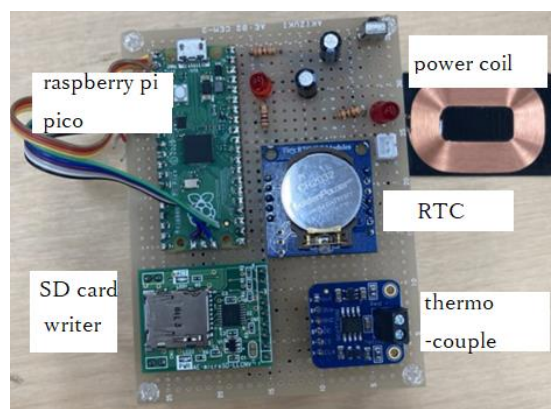


Fig.10 New board for throw in CTD Sensor.