

揚鉦に用いる粒状体を含む粘性流動体が鉦石に及ぼす力について 球の沈降実験による検討

東京海洋大学 学生会員 ○折田 清隆, 正会員 谷 和夫
(株)不動テトラ 古庄 哲士, 鈴木 亮彦, 田中 肇一

1. はじめに

圧送性と材料不分離性を持つキャリア物質（粒状体＋粘性流動体，以下 CM）による海底鉦物資源の揚鉦方法（図-1(a)）が提案された¹⁾。揚鉦性能の評価に CM が鉦石に及ぼすせん断応力の寄与分である抗力 F_D （図-1(b)）の把握が必要である。そこで，構成・性質に近い高流動コンクリートを参考に CM をビンガム流体と仮定し²⁾， F_D に影響する塑性粘度 η_p と降伏応力 τ_y を求めた。

2. 塑性粘度，降伏応力の導出方法

静止したビンガム流体中で沈降速度 v_0 の球（直径 d_0 ）が受ける F_D は η_p と τ_y の項の和で表される（式(1)）。この式はレイノルズ数 $Re < 130$ での実験結果と高い整合性を示したため，ストークス域と遷移域で有効である³⁾。

$$F_D = 3\pi d_0 v_0 \eta_p + \frac{7}{8} \pi^2 d_0^2 \tau_y \quad (1)$$

式(1)を式(2)に変形すると， v_0/d_0 と $F_D/3\pi d_0^2$ は勾配が η_p ，切片が $7\pi\tau_y/24$ の一次関数となる²⁾。そこで，鉦石モデル（鉦石を模した球体）の沈降実験から v_0 を，運動方程式から F_D を求め， η_p と τ_y を導出する。

$$\frac{F_D}{3\pi d_0^2} = \frac{v_0}{d_0} \eta_p + \frac{7\pi}{24} \tau_y \quad (2)$$

3. 鉦石モデルの沈降実験の方法

図-2 に実験装置を示す。表-1 の CM (CMC 水溶液（以後，Caq）及び CMC 水溶液＋東北 6 号珪砂（以後，Cs））を高さ 3.70 m，内径 0.10 m の沈降容器の高さ 3.60 m 地点まで入れた。なお， C_w ， C_t ， C_p は水，増粘剤（CMC：カルボキシメチルセルロース），粒状体（東北 6 号珪砂）の質量パーセント濃度である。直径 $d_0 = 12.7 \sim 19.1 \times 10^{-3} \text{ m}$ ・密度 $\rho_0 = 2.2 \sim 6.1 \text{ Mg/m}^3$ の鉦石モデル（表-2）を CM の表面下 0.10 m 地点から沈降させ，沈降開始時での図心の位置を沈降距離 $l = 0.00 \text{ m}$ とする。また， d_0 は JISZ8803 の球落下式粘度計に従い沈降容器の内径の 20%未満とした⁴⁾。

沈降速度の計測には RFID システムを用いた⁵⁾。各鉦

石モデルの図心に RF タグを埋め込み，それらの通過をアンテナ $A_1 \sim A_4$ （設置位置： $l = 0.20, 0.70, 1.70, 2.70 \text{ m}$ 又は $0.20, 1.20, 2.20, 3.20 \text{ m}$ ）で検知した。

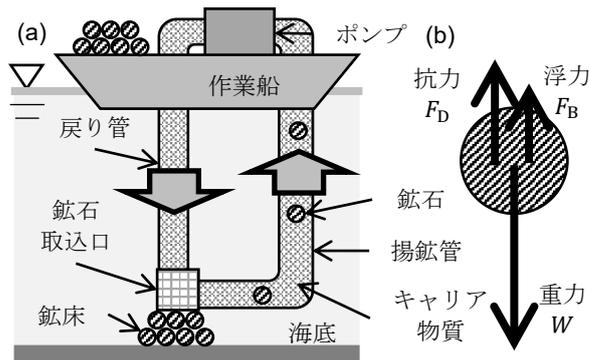


図-1 CM 循環方式(a)概要，(b)揚鉦中の鉦石に働く力

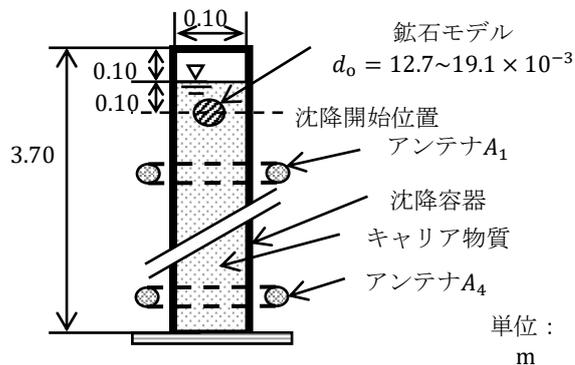


図-2 沈降実験装置

表-1 実験に用いた CM の構成

| キャリア物質 | C_w (%) | C_t (%) | C_p (%) | C_t/C_w (%) | ρ_c (Mg/m ³) |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|---------------|-------------------------------|
| CMC 水溶液 | 99.50 | 0.50 | - | 0.50 | 1.0 |
| CMC 水溶液 + 6 号珪砂 | 84.58 | 0.42 | 15.00 | 0.50 | 1.3 |

表-2 実験に用いた鉦石モデル

| 材質 | 密度 ρ_0 (Mg/m ³) | 直径 d_0 ($\times 10^{-3} \text{ m}$) | | |
|-----------|----------------------------------|---|------|------|
| | | 12.7 | 15.9 | 19.1 |
| PTFE (P) | 2.2 | d12 | d15 | d19 |
| アルミナ (A) | 3.9 | | | |
| ジルコニア (Z) | 6.1 | | | |

キーワード 海底鉦物資源，揚鉦，ビンガム流体，模型実験，計測

連絡先 〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7 東京海洋大学 TEL：03-5463-0400 E-mail：m193019@edu.kaiyodai.ac.jp

4. 計測結果・考察

図-3 に鉱石モデル($d_o = 12.7 \text{ mm}$)を用いた場合の各CM中での l と各アンテナの通過時刻 t の関係を示す。 $t \approx 0$ では加速度 $a > 0$, $t = \infty$ で終端速度に至り $a = 0$ になると予想される。しかし、 $l-t$ グラフの勾配は t の増加に応じて緩やかに減少した。これは実験中に粒状体が沈降し、CMが非一様になったためと推測される。

一方で、 l と t の関係は概ね線形であることから、式(3)で近似して球の沈降速度 v_o を導出した。

$$l = v_o t \tag{3}$$

図-4 に v_o と F_D の関係を示す。CM中を沈降する質量 m_o の鉱石モデルの運動方程式は F_D , 浮力 F_B , 重力 W で表される(式(4))。 $a = 0$ の時に F_D は W と F_B の差となり、鉱石モデルとCMの密度 ρ_o, ρ_c を用いて導出できる(式(5))。同径の鉱石モデルでは、基本的に v_o はCaq中 $>$ Cs中, F_D はCs中 $>$ Caq中であった。

$$F_D + F_B - W = m_o a \tag{4}$$

$$F_D = W - F_B = \frac{1}{6} \pi d_o^3 g (\rho_o - \rho_c) \tag{5}$$

図-5 に式(2)を用いた η_p と τ_y の導出結果を示す。水が τ_y を持たないビンガム流体だと想定すると、 $(\eta_p, \tau_y) = (1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}, 0.0 \text{ Pa})$ となる⁶⁾。それに対しCaqでは $(\eta_p, \tau_y) = (0.8, 8.8)$ と η_p が800倍に増加し、 τ_y を發揮した。また、Csでは $(\eta_p, \tau_y) = (1.3, 8.4)$ となり、 τ_y はCaqと近い値を示すが、 η_p は水の1300倍となった。

本稿と同じ配合のCMを用いた小型揚鉱実験では、同じ鉱石モデル・鉛直方向流速での揚鉱速度は常にCs中 $>$ Caq中 $>$ 水中であった⁵⁾。これはCMの η_p と τ_y の増加により小さい流速でも大きな F_D が發揮された結果と考えられる。しかし、 η_p と τ_y の増加は管壁との摩擦の増加に伴う圧送性の低下に繋がる。そのため、揚鉱性能と圧送性の双方に配慮したCMの配合が必要である。

5. まとめ

RFIDを用いた球の沈降実験を行い、キャリア物質をビンガム流体と仮定して塑性粘度 η_p と降伏応力 τ_y を求めた。その結果、CMCと珪砂を配合することで η_p は水の800~1300倍に増加し、水には無い τ_y は8 Pa以上になると判明した。双方の増加により、鉱石モデルに小さい流速のキャリア物質が大きな抗力 F_D を及ぼしたため、揚鉱性能が向上したと考えられる。

謝辞：この研究は科学研究費補助金「基盤研究A：17H01355」の援助を受けた。ここに記して謝意を示す。

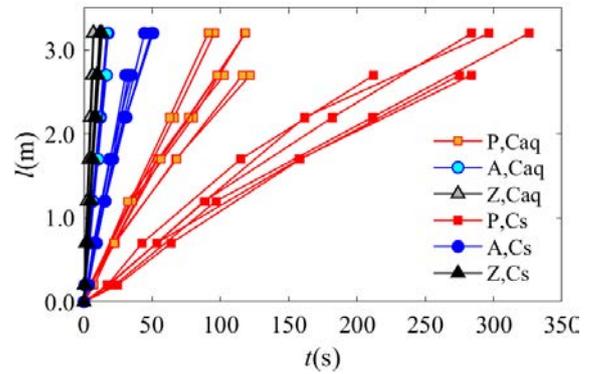


図-3 計測結果 ($d_o = 12.7 \text{ mm}$ の場合)

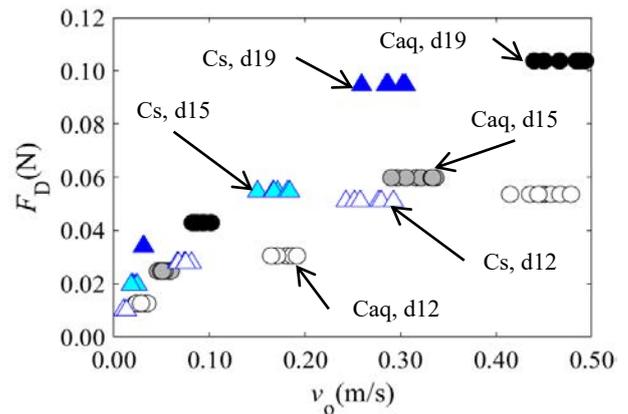


図-4 v_o と F_D の関係

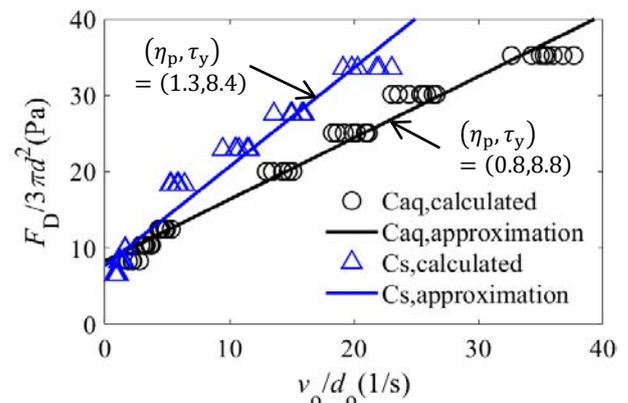


図-5 各キャリア物質の η_p と τ_y

参考文献

- 1) 谷和夫, 大林淳, 鈴木亮彦, 田中肇一: キャリア物質, これを用いる海底有価物質の揚鉱方法及び揚鉱装置, 特開2019-120063, 2019.
- 2) 吉野公: 流動性コンクリートのワーカビリティ評価に関する研究, 名古屋大学博士論文, pp.29-60, 1994.
- 3) Ansley, R. W. and Smith, T. N: Motion of Spherical Particles in a Bingham Plastic, *AIChE Journal*, Vol.13, No.6, pp.1193-1196, 1967.
- 4) 日本産業規格: JISZ8803, 2016.
- 5) Orita, K., Tani, K., Suzuki, A., Suga, S. and Tanaka, K: Development of RFID System for Monitoring Ore Model to Study the Feasibility of Carrier Materials in Lifting Experiment, *Proc. of YSRM2019 & REIF2019*, 1-3-2, 2019.
- 6) 国立天文台. (2017). 理科年表, 丸善出版, 429p.