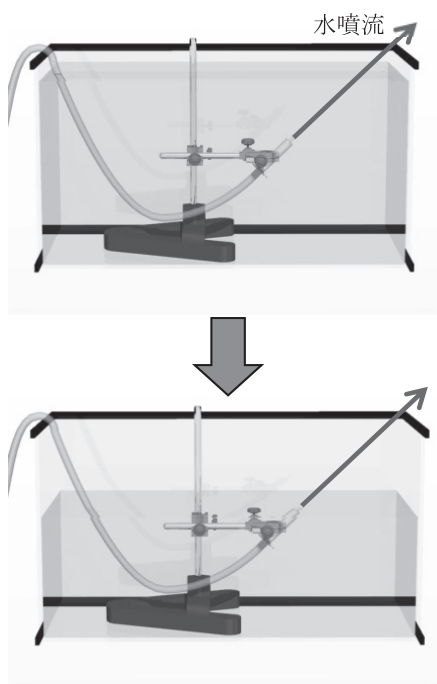


水噴流による水浄化の研究

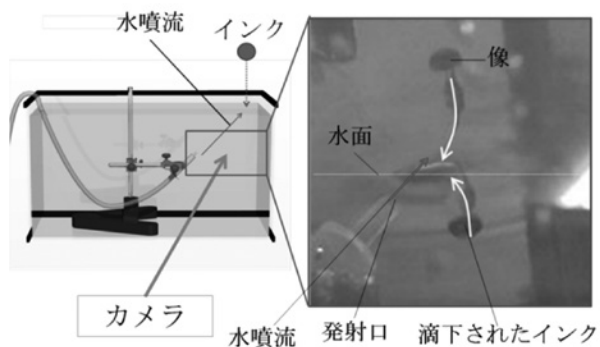
広島県立広島国泰寺高等学校 理数ゼミ 物理班

I 序論

図I-1のように、水面下から水面上に向けて水噴流を発射すると水槽の水がしだいに減少する現象を発見した。図I-2のように、水面にインクを滴下したところ、水面付近のインクが水噴流に引き寄せられることが観察された。以上の現象より、水噴流は、水面の水を輸送し、水槽の水が減少していると考えた。

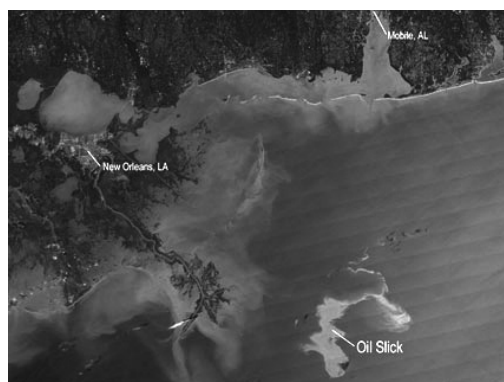


図I-1 水面下から発射された水噴流による水輸送の現象



図I-2 インク滴下による水流の観測

現在、海の汚染の問題が深刻化している。たとえば、図I-3のメキシコ湾原油流出事故である。この事故で490万バレルの原油が流出した。また、海面の汚染問題として、図I-4のように太平洋ゴミベルトなどの海面のゴミ問題及び図I-5の赤潮などの異常発生が問題となっている。



図I-3 メキシコ湾原油流出事故（参考文献2）



図I-4 太平洋ゴミベルト（参考文献3）



図I-5 赤潮の異常発生（参考文献4）

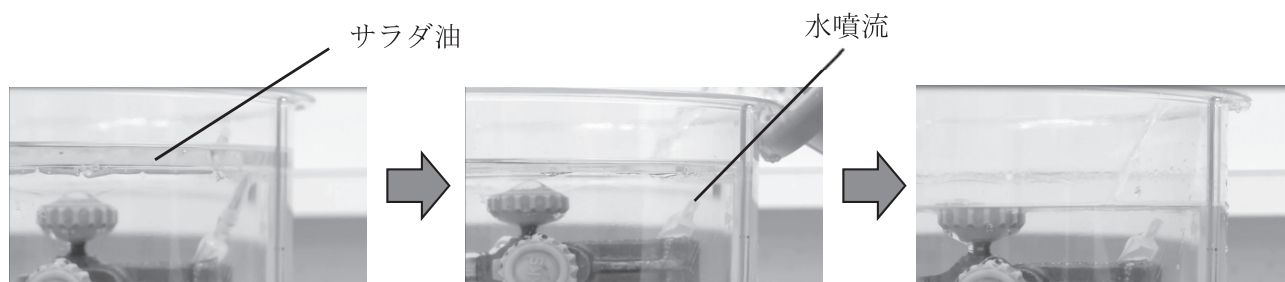


図 I-6 水面に浮かべたサラダ油が水噴流に輸送される様子



図 I-7 直径1cmの発泡スチロール球が輸送される様子

水噴流を水面下から発射すると、水面の水を輸送することから原油流出事故等で海面を汚染している原油の処理や水面上のゴミの回収に利用できるのではないかと考えた。図 I-6 のように水面にサラダ油を浮かべ、水噴流を水面下から水面上に向けて発射したところ、水面に浮いたサラダ油をすべて回収することに成功した。また、図 I-7 のように、水面に発泡スチロール球を浮かべて、水噴流を水面下から水面上に向けて発射したところ、水面に浮かべた発泡スチロール球をすべて回収することに成功した。

私たちは、以上の実験から、水噴流は水の浄化に利用できると考え、本研究を行った。

II 目的

本研究の目的は、次の3点である。

① 水噴流の水輸送現象に関する基礎的研究

水噴流の水輸送現象に関する実験を行い、水噴流が輸送する水量に関する基礎的なデータを集め、水噴流の水輸送現象を理論的に解明する。

② 水噴流を用いた海面の原油回収に関する理論的考察

①で得られた理論を用いて、水噴流を用いた場合の水面上の油回収の可能性についての考察を行う。

③ 水噴流を用いた水上漂流ゴミの回収装置開発とその回収量の考察

水上漂流ゴミの回収装置を製作し、ゴミ回収に関する基礎的なデータを集め、①で得られた理論を用いて、

水噴流を用いた場合の水面上のゴミ回収の可能性についての考察を行う。

III 実験方法

1 水噴流の基礎実験

(1) 水噴流発射装置

図 III-1 が水噴流の発射装置を示したものである。図



図 III-1 水噴流の発射装置

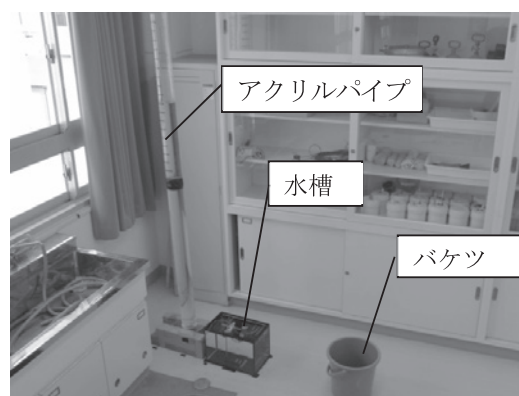
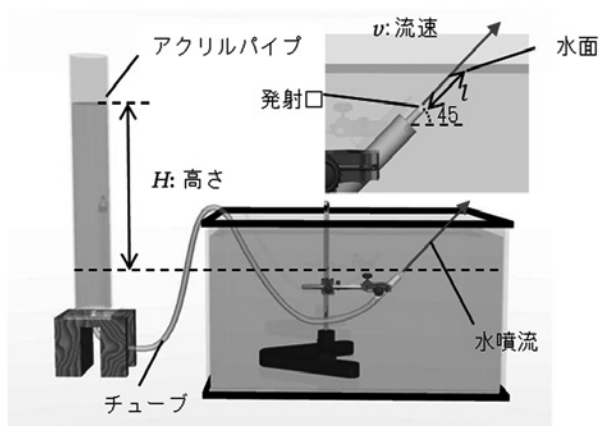


図 III-2 実験装置の全体図

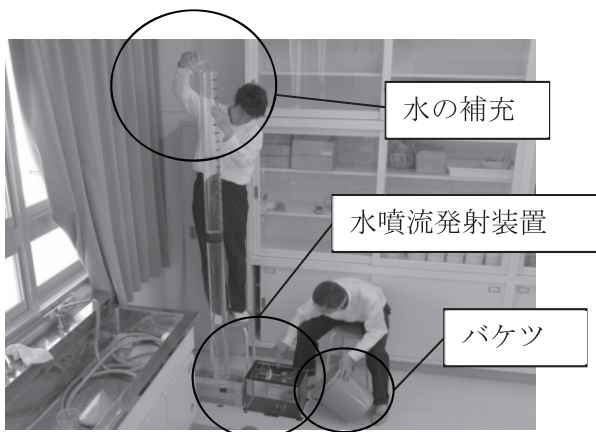
Ⅲ-2が実験装置の全体写真を示したものである。高さ2mの亚克力パイプと注射器をチューブでつなぎ、亚克力パイプを水で満たし、注射器から水噴流を発射させた。

(2) 実験方法

- ① 図Ⅲ-3のように、スタンドに取り付けた注射器の先が水面下に沈むように水槽を水で満たし、注射器の先端と水面との距離 l を測定する。今回、 $l=5.7\text{mm}$ に固定し、水噴流発射口の角度を 45° に固定した。
- ② アクリルパイプに水を注ぎ、アクリルパイプの水面の高さに水性ペンを用いて印を付けておく。図Ⅲ-3のように、水噴流発射口からアクリルパイプの水面までの高さ（以下、水柱の高さとする。）を H とする。水噴流の流速の変化は、水柱の高さ H を変化させることで行う。
- ③ 水噴流の流速が変化しないように、水噴流の発射中は、図Ⅲ-4のように、アクリルパイプにつけた水性ペンの印から水位が変わらないよう、ピーカー A からアクリルパイプに水を補充し続ける。ピーカー A の減少した水量を m とする。また、図Ⅲ-4のように、注射器の先端と水面との距離 l が変化しないように、常に



図Ⅲ-3 水噴流発射装置モデル



図Ⅲ-4 実験の手順

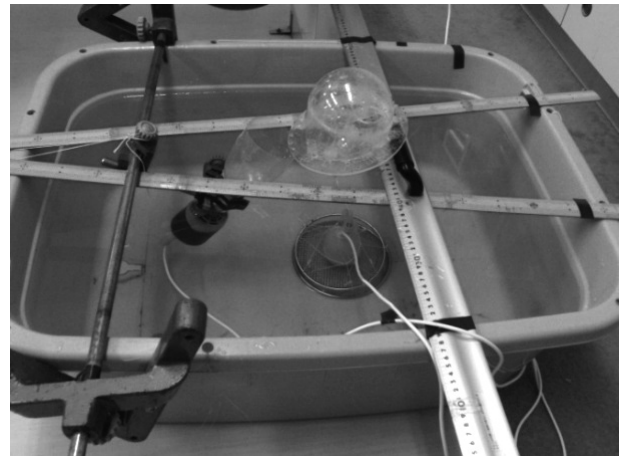
メスシリンダーを使って水槽に水を補充し続ける。

- ④ 30秒間、水噴流を発射して、バケツに溜まった水量 M を測定する。そして、水噴流によって巻き込まれた水量 $Q=M-m$ で求める。

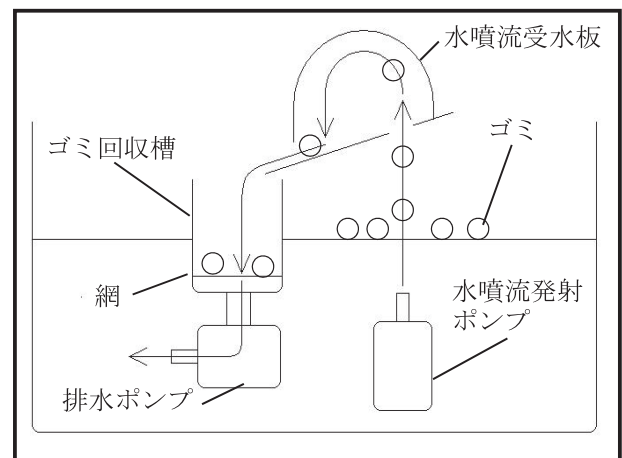
2 水噴流を用いた水上漂流ゴミ回収実験

(1) 水上漂流ゴミ回収装置

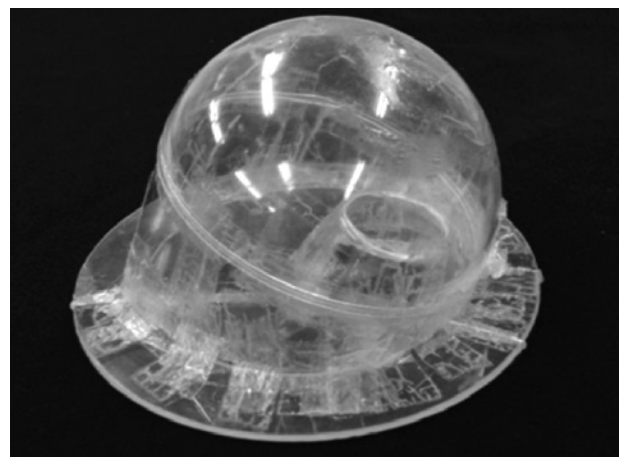
図Ⅲ-5に水上漂流ゴミ回収装置、図Ⅲ-6にその模



図Ⅲ-5 水上漂流ゴミ回収装置



図Ⅲ-6 水上漂流ゴミ回収状況の模式図



図Ⅲ-7 水噴流受水板（側面）

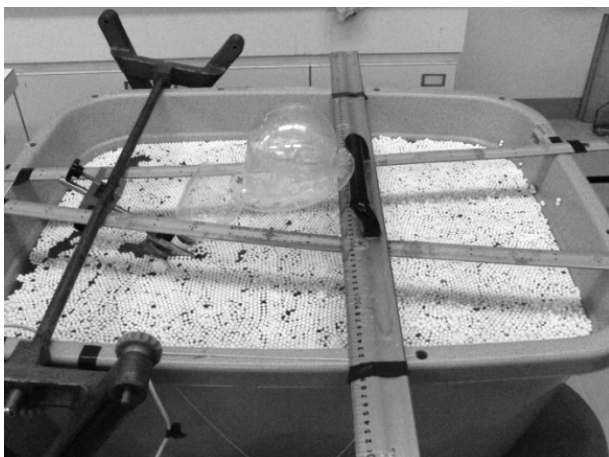


図Ⅲ-8 ゴミ回収槽

式図を示す。水面下より水噴流発射ポンプから水噴流を発射すると、水面上のゴミが輸送され、図Ⅲ-7の水噴流受水板を通り、図Ⅲ-8のゴミ回収槽にたまる。ゴミ回収槽の底に網があり、網にゴミが捕捉される。このとき、効率よくゴミを回収するために、ゴミ回収槽に流入した水は排水ポンプによって水中に排水される仕組みとなっている。

(2) 実験方法

ゴミ回収装置の性能を調べるために、図Ⅲ-9のように、水面に直径6mmの発泡スチロール球を浮かべて、水噴流の条件を変えて、30秒間ゴミ回収装置を稼働させ、発泡スチロール球を回収し、その回収量 r を計測する。



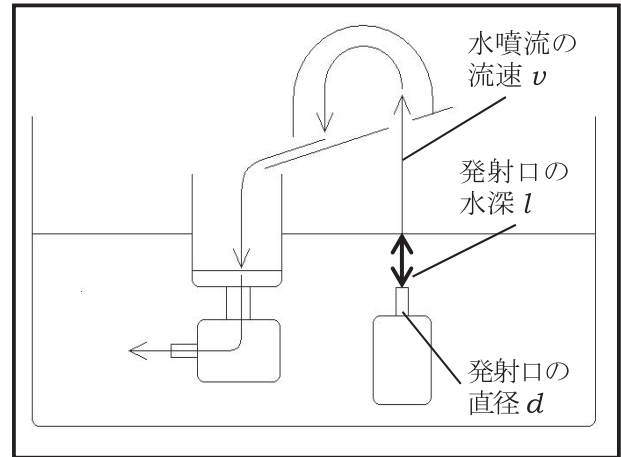
図Ⅲ-9 水噴流によるゴミ回収の実験

図Ⅲ-10は、ゴミ回収実験の諸物理量を示している。次の①～③の実験を行った。

- ① $d=2\text{mm}$ で水噴流の流速 v を一定として、水噴流発射口の水深 l を5mmから35mmまで5mmずつ変化させ、発泡スチロール球の回収量 r を測定する。
- ② $d=2\text{mm}$ で水噴流発射口の水深 l を一定として、水

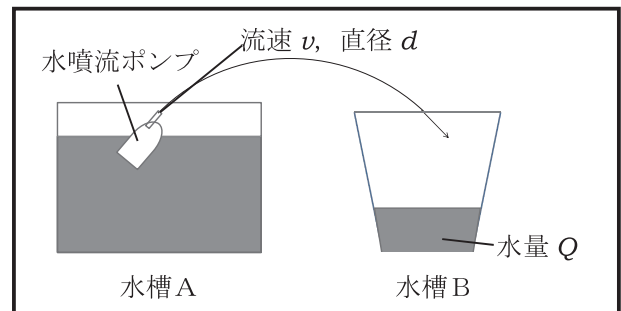
噴流の流速 v を変化させ、発泡スチロール球の回収量 r を測定する。

- ③ 水噴流ポンプの発射口の直径 d を2mm、5mm、8mmのそれぞれ状態で流速 v を変化させ、発泡スチロール球の回収量 r を測定する。



図Ⅲ-10 ゴミ回収実験の諸物理量

今回の実験の水噴流の流速 v は、次のように決定した。図Ⅲ-11のように、使用する水噴流ポンプに加える電圧を40Vから100Vまで20Vずつ変化させ、水槽Aから別の水槽Bへ水を移していく。5分間稼働させたのち、移した水槽B内の水量から単位時間当たりの流量を求める。そして、流量 Q と発射口の断面積 A と流速 v の関係は、 $Q = Av$ で表せる。このことから $v = Q/A$ となる。



図Ⅲ-11 流速の計測方法

Ⅳ 結果

1 水噴流に関する基礎実験

図Ⅳ-1は、水噴流により水が輸送される状態を示したものである。直径 d の発射口から、流速 v の水噴流を単位時間あたり流量 m で発射し、水面の水が流量 Q だけ輸送されている。なお、水噴流発射口の水深は l である。

以下の実験結果をグラフに示す。

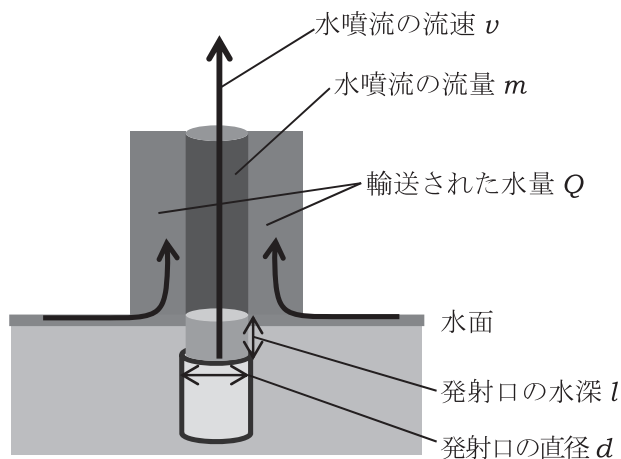
実験結果1: 水噴流に輸送された水量 Q と水噴流の流

速 v ($l=5.7\text{mm}, d=1.8\text{mm}$)

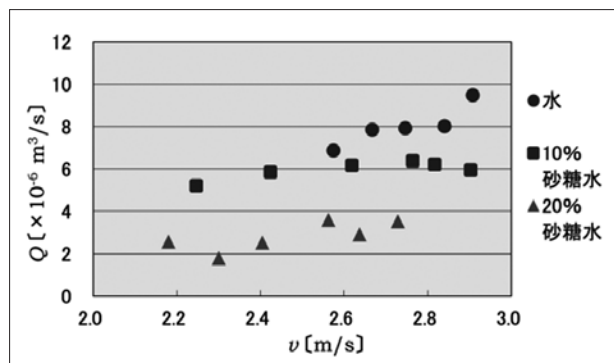
実験結果2: 水噴流に輸送された水量 Q と水噴流発射口の水深 l ($d=1.8\text{mm}, H=1.8\text{m}$)

実験結果3: 水噴流に輸送された水量 Q と使用した液体の粘性 μ

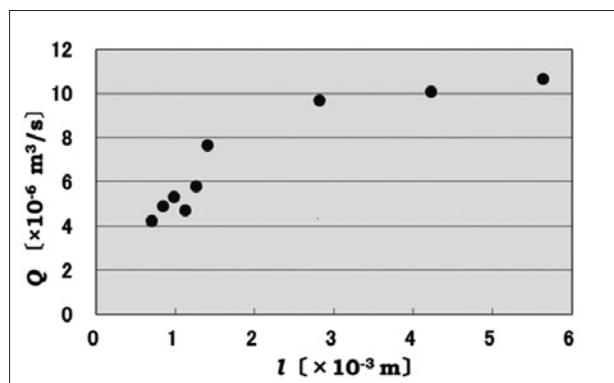
実験結果4: 水噴流の流量 m に対する輸送された水量 Q の割合 Q/m と発射口の直径 d ($l=5.7\text{mm}, H=1.8\text{m}$)



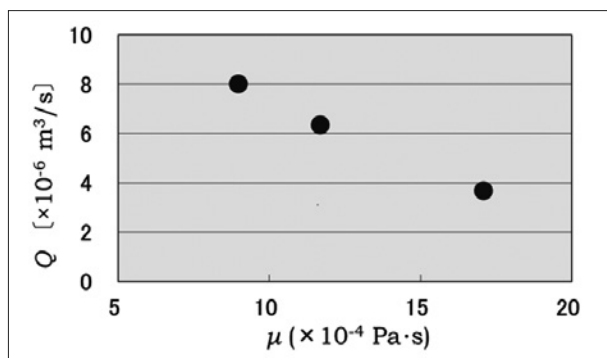
図IV-1 水噴流のモデル



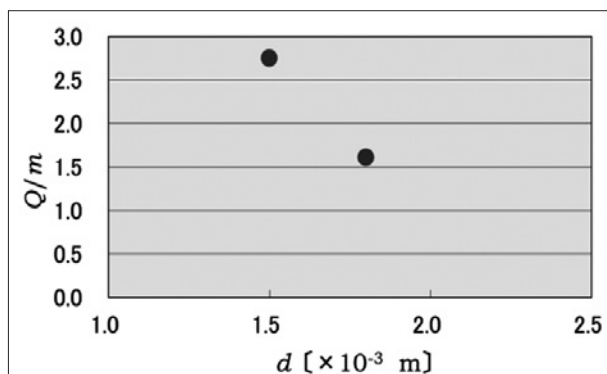
図IV-2 実験結果1



図IV-3 実験結果2



図IV-4 実験結果3



図IV-5 実験結果4

2 水噴流を用いた水上漂流ゴミ回収実験

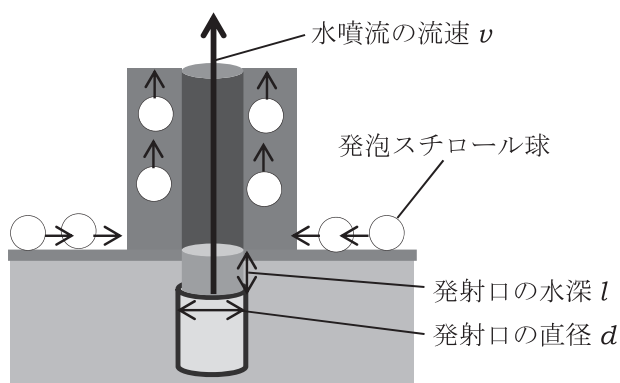
図IV-6は、水噴流によりゴミが輸送される状態を示したものである。直径 d の発射口から、流速 v の水噴流が30秒間発射され、発泡スチロール球が質量 r だけ輸送される。

以下の実験結果をグラフに示す。

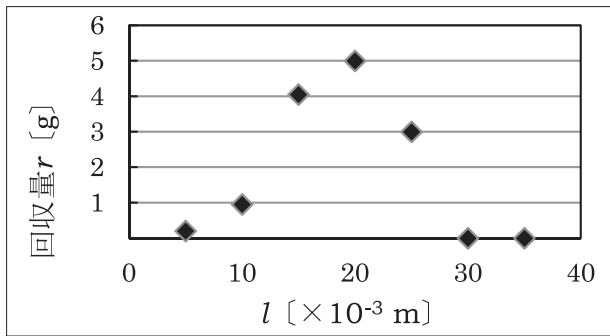
実験結果1: 発泡スチロール球の回収量 r と水噴流発射口の水深 l ($v = 8\text{m/s}, d = 2\text{mm}$)

実験結果2: 発泡スチロール球の回収量 r と水噴流の流速 v ($l = 20\text{mm}, d = 2\text{mm}$)

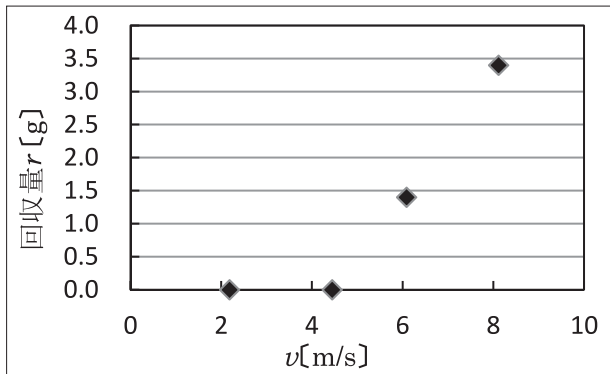
実験結果3: 発泡スチロール球の回収量 r と水噴流の流速 v ($l = 20\text{mm}$)



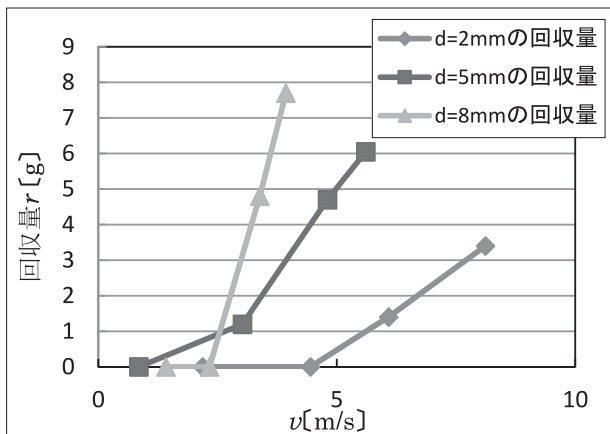
図IV-6 ゴミが輸送される状態



図Ⅳ-7 実験結果1



図Ⅳ-8 実験結果2

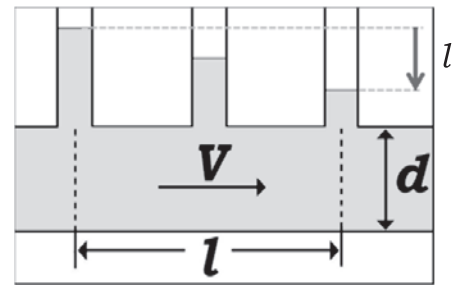


図Ⅳ-9 実験結果3

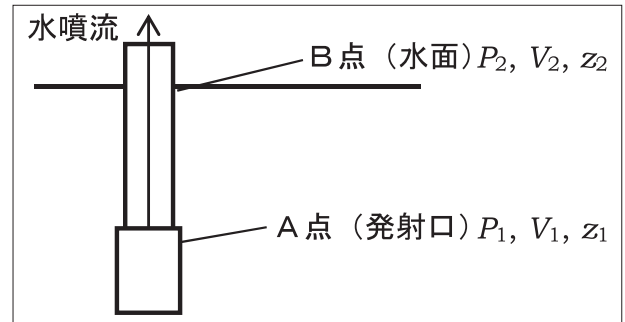
V 考察

1 水噴流によって輸送される水面の水量についての理論的考察

図Ⅴ-1のように、管に流体を流したときには、圧力損失が生じる。今回、水面の水が輸送される原因は、水噴流による発射口（A点）と水面（B点）との間の圧力損失によるためと考えた。図Ⅴ-2のように、水流のA点での圧力を P_1 、流速を V_1 、高さを z_1 、B点での圧力を P_2 、流速を V_2 、高さを z_2 とする。



図Ⅴ-1 圧力損失



図Ⅴ-2 水噴流発射時における圧力損失

ベルヌーイの定理と圧力損失の関係式（式1）が知られている。

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \Delta h \quad (\Delta h: \text{圧力損失}) \quad (\text{式1})$$

今回、 $V_1 \approx V_2$ 、 $z_1 \approx z_2$ と仮定すると、 $\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}$ が得られる。

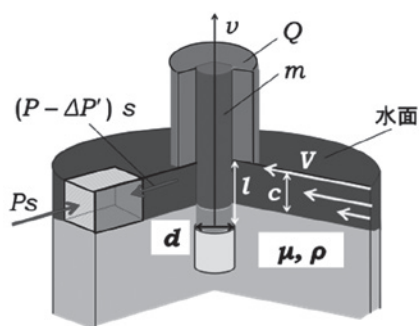
また、ダルシー・ワイスバッハの式（式2）が知られており、この式を使うと、

水噴流による圧力損失 $\Delta P = P_2 - P_1$ は（式3）のように求めることができる。

$$\Delta h = \lambda \frac{l V^2}{2 g d} \quad \left(\lambda = \frac{0.3164}{R_e^{\frac{1}{4}}}, R_e = \frac{\rho V d}{\mu} (R_e: \text{レイノルズ数}) \right) \quad (\text{式2})$$

$$\Delta P = 0.1582 \quad l v \cdot \sqrt[4]{\frac{(\rho v)^3 \mu}{d^5}} \quad (\text{式3})$$

圧力損失 ΔP が生じることにより、水面の水が水噴流に輸送されると考えた。次に、図Ⅴ-3のような水噴流のモデルを作成した。

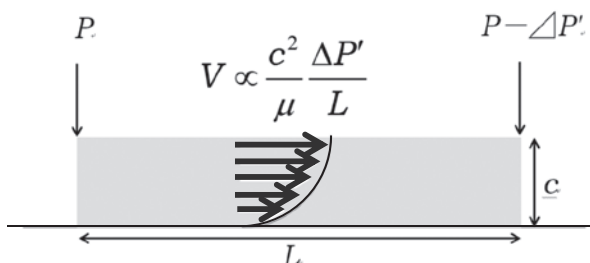


v : 水噴流の流速, l : 水噴流発射口の水深
 ρ : 液体の密度, μ : 液体の粘性
 d : 発射口の直径, V : 水面の流速, ΔP : 圧力

図V-3 水噴流のモデル

(参考文献5)より、図V-4のように、平面に粘性率 μ 、高さ c の薄膜の流体が圧力差 $\Delta P'$ の状態に置かれたとき、流体の平均速度は図V-4の V のように与えられ、薄膜の単位幅あたりの流量 q は、(式4)のように与えられることが知られている。なお、 f は、単位体積当たりの力を表す。

$$q \propto \frac{c^3}{\mu} f \quad (\text{式4})$$



図V-4 薄膜流体の圧力差による流量

水噴流により単位時間当たりに輸送される水面の水量を Q とすると $Q = kf$ (式5)である。

今回の水噴流の研究では、(式4)の f は(式6)のように表せる。なお、 ΔP は、(式3)である。

$$f = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \Delta P \quad (\text{式6})$$

(式5)と(式6)・(式3)より、(式7)を得ることができる。

$$Q = k \frac{c^3}{\mu} f = k \frac{c^3}{\mu} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \Delta P$$

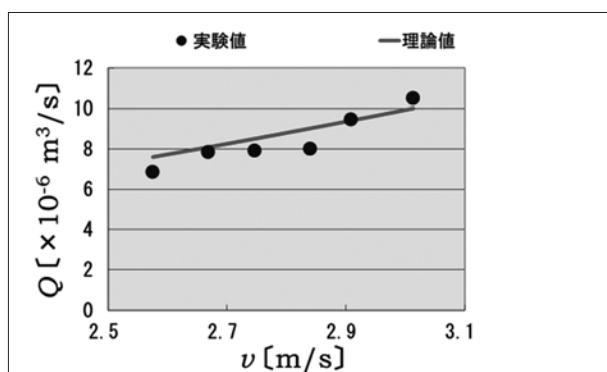
$$Q = \frac{0.1582}{4} k \pi^2 c^3 l v \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{\rho d v}{\mu} \right)^3} \quad (\text{式7})$$

よって、図V-3の水噴流のモデル及び(式7)から、輸送される水面の水量 Q を(式8)のように算出した。なお、(式8)の α は実験値からの定数である。また、水噴流の流量に対する輸送された流量の割合 Q/m は、(式9)のように与えられる。なお、(式9)の β は実験値からの定数である。

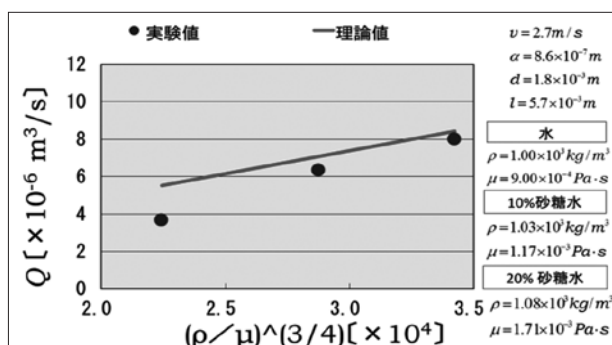
$$Q = (\alpha l v) \cdot \left(\frac{\rho d v}{\mu} \right)^{3/4} \quad (\text{式8})$$

$$\frac{Q}{m} = \frac{Q}{\left(\frac{\pi d^2}{4} v \right)} = (\beta l) \cdot \left(\frac{1}{d} \right)^{5/4} \left(\frac{\rho v}{\mu} \right)^{3/4} \quad (\text{式9})$$

次のグラフは、実験値と(式8)(式9)による理論値の比較である。よく一致している。



図V-5 輸送された水量 Q と水噴流の流速 v の関係



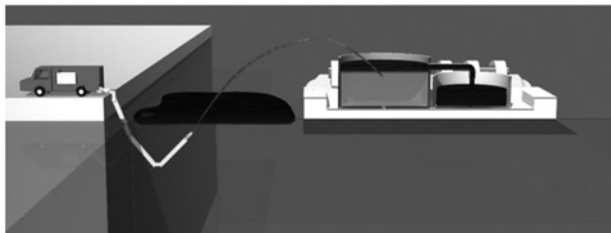
図V-6 輸送された水量 Q と $(\rho/\mu)^{3/4}$ の関係

2 水噴流による海面の原油回収についての考察

水噴流の現象は、図I-6の実験から、海面に流出した原油の回収に使えと考えた。たとえば、メキシコ湾に流出している原油の体積は $7.95 \times 10^5 \text{ m}^3$ である。

$Q = \alpha l v (\rho d v / \mu)^{3/4}$ の式に次の(値1)を入れて、消防車10台(消防車は1台あたり毎分1130L 発射するとする。)を用いた場合、すべてを回収できる時間を計算すると約1年であることが分かった。

$$\begin{aligned}
 \alpha &= 3.4 \times 10^{-7} \text{ m}, \\
 l &= 5.7 \times 10^{-3} \text{ m}, \\
 \rho &= 1.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, \\
 \mu &= 1.08 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}, \\
 d &= 2.45 \times 10^{-2} \text{ m}, \\
 v &= 40 \text{ m/s}
 \end{aligned}
 \quad (\text{値1})$$

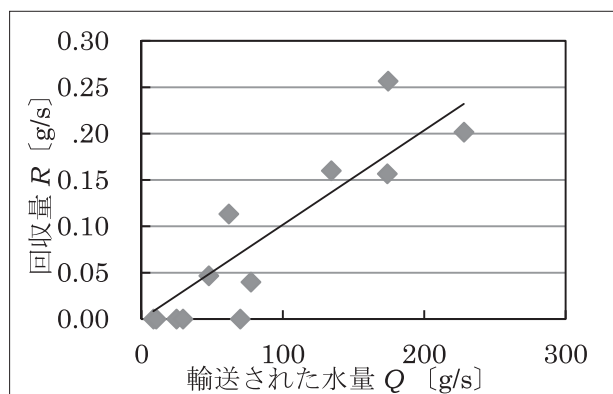


図V-7 原油回収装置のモデル

3 水噴流によるゴミ回収についての考察

今回試作した装置では、発射口の水深が20mmの際、最も効率的にゴミの回収を行うことができた。また、水噴流の流速が大きいほど回収量が増えることが明らかとなった。

図V-8は、単位時間当たりの輸送された水量 Q とゴミ回収量 R との関係を示したものである。このグラフは、水噴流の基礎データの考察で立てた $Q = \alpha l v (\rho dv/\mu)^{3/4}$ (式8) に代入し求めた理論値と図IV-9の実験値から作成した。このグラフから、単位時間当たりの輸送された水量 Q とゴミ回収量 R にはほぼ比例の関係があることが明らかとなった。



図V-8 輸送された水量 Q とゴミ回収量 R との関係

図V-8より、単位時間当たりに回収される発泡スチロール球の量は、

$$R = (k l v) \cdot \left(\frac{\rho dv}{\mu} \right)^{3/4} \quad (k=9.5 \times 10^{-10}) \quad \text{と表せることが分かった。}$$

この式から、消防車1台を用いて、24時間水噴流 ($l=20\text{mm}$, $v=40\text{m/s}$) を発射すると、約2ton程度の発泡スチロール球のゴミが回収されることとなる。

VI 結論

1 水噴流の水輸送現象に関する基礎的研究

水噴流が水面の水を輸送する原因は、水噴流による圧力損失の影響である。水噴流によって、輸送される水量は、 $Q = \alpha l v (\rho dv/\mu)^{3/4}$ で表せることが明らかとなった。また、発射口の直径 d を小さくすると、発射された水噴流の2倍以上の水が輸送される場合があることが分かった。

2 水噴流を用いた海面の原油回収に関する理論的考察

水噴流を使って、メキシコ湾の原油流出事故により流出している原油を回収する時間を $Q = \alpha l v (\rho dv/\mu)^{3/4}$ の式から計算すると、消防車10台を用いた場合、約1年で回収できることが分かった。

3 水噴流を用いた水上漂流ゴミの回収装置開発とその回収量の考察

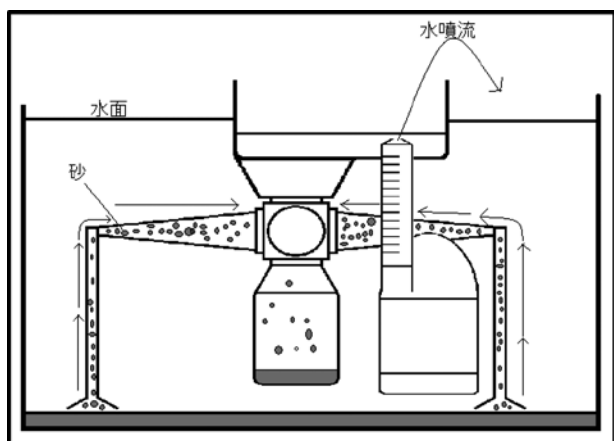
水噴流を用いた水面のゴミ回収量は、水噴流の流速、発射口の直径が大きくなるほど増加する。輸送された水量と回収量を比較すると、ほぼ比例関係があることが明らかとなり、水噴流に巻き込まれる水量 Q と単位時間当たりの回収される発泡スチロール球の質量 R との関係が $R = kQ$ (k :定数) と表せることが分かった。この式から消防車1台を24時間稼働させると、発泡スチロール球を約2 ton程度回収できることが明らかとなった。

VII 展望 (海底に蓄積されている放射性物質の回収について)

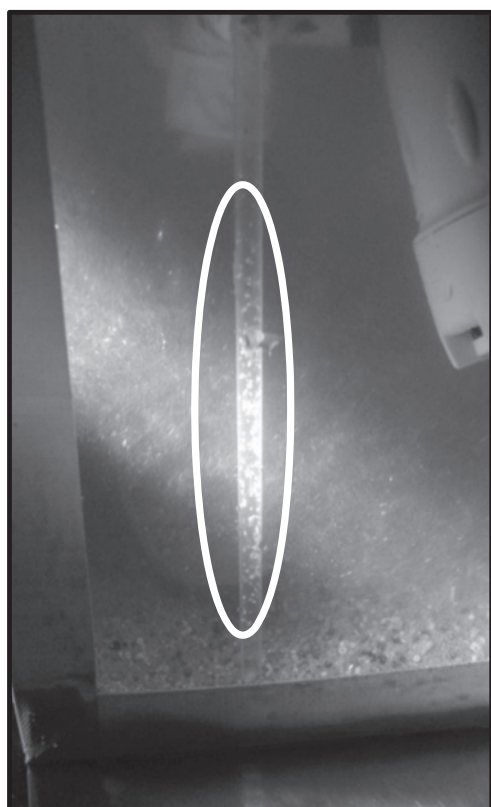
東京電力の福島第一原子力発電所の事故により、セシウムが海底にたまっていることが報告されている (参



図VII-1 海底セシウム回収装置



図VII-2 海底セシウムの回収の様子



図VII-3 砂回収中の吸引管の様子

参考文献9)。このセシウムを水噴流で回収する方法を現在考案している。図VII-1は、海底セシウム回収装置を示したものである。今回考案した方法によると、ポンプ機器を放射能で汚染することなく回収できると考える。

水噴流の直径を8mmとして、次のような実験を行った。

- ① 図VII-1の海底セシウム回収装置を図VII-2のように水槽に固定する。
- ② 装置上部の水輸送部内の発射口よりも水面が高くなるように水を注水し、直径およそ1mm～2mmの砂を水槽底面に敷き詰める。
- ③ 吸引管が水槽底面から少し上部の地点になるように装置を調整し、水噴流を発射する。

図VII-3は、砂回収中の吸引管の様子を撮影したものである。

このように、水噴流を使うことで、海底に蓄積されたセシウムを回収できるのではないかと考えている。今後は、回収量を実験で確かめていきたい。

◆参考文献

- 1) 上田和茂, 土井ひらく, 志賀浩一.「水噴流による水輸送倍増効果」. 2013年度日本物理学会第9回Jr.セッション応募原稿. 2013.
- 2) NASAホームページ.「メキシコ湾原油流出事故写真」.
http://www.nasa.gov/topics/earth/features/oilspill/oil_spill_gallery.html
- 3) ナショナルジオグラフィック.「太平洋ゴミベルト写真」.
http://www.nationalgeographic.co.jp/news/news_article.php?file_id=2009090903&expand#title
- 4) 名古屋市上下水道局.「赤潮と青潮」.
<http://www.water.city.nagoya.jp/intro/library/alacarte/content5.html>
- 5) ドウジェンヌ, プロシャール・ヴィアール, ケレ.「表面張力の物理学」. 吉岡書店. 2009
- 6) 松尾一泰.「流体の力学—水力学と粘性・完全流体力学の基礎—」. 理工学社. 2007
- 7) Sugar Engineers.
<http://www.sugartech.co.za/viscosity/index.php>
- 8) アメリカ国立衛生研究所.「ImageJ」. <http://rsbweb.nih.gov/ij/>
- 9) 朝日新聞DIGITAL.「海底のくぼみに高濃度セシウム福島第一原発で発見」.
<http://www.asahi.com/national/update/0808/TKY201308070567.html>