

円形水路による流出油・海水 分離システムの開発

DEVELOPMENT OF THE SYSTEM FOR SEPARATING OIL AND WATER BY SEMI-CIRCULAR WATERWAY

近藤浩文¹・石川亮¹・米田克幸²・大塚夏彦³・佐伯浩⁴

Hirofumi KONDO, Ryo ISHIKAWA, Katuyuki MAITA, Natuhiko OTUKA, Hiroshi SAEKI

¹北海道大学大学院工学研究科 (〒001-0013 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

²西村組(株) (〒099-64 紋別郡湧別町栄町)

³正会員 工博 北日本港湾コンサルタント(株) (〒003-0029 札幌市白石区平和通 2 丁目北 11 番 18 号)

⁴フェロー 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

In the Nahotokha oil spill, the use of a crane bucket was found to an effective method for recovering the oil under low temperature and rough sea. However, a system for separating oil from water that is also collected in the bucket is needed for this recovery method. This paper describes the system for separating oil and water that uses conduit with a semi-circular cross section that has drainage holes in the bottom. Experiments were carried out under the conditions of unsteady flow. From the experimental results, design parameters of the system were discussed.

Key Words: Oil spill, Oil recovery, Unsteady flow, Semi-circular water way

1. 背景

現在, サハリン島東部沿岸域における原油開発プロジェクトが進行しており, 2000 年には約 160 万 kl が生産されたといわれている。2002 年には, 通年生産を目指した施設建設が始まり, 冬期を含めた原油生産が現実化してきた。生産された原油はタンカーに積み, オホーツク海や宗谷海峡を通して輸送する。これに伴い, 北海道近海での油流出事故の危険性が増大することが指摘されている。また, 海底パイプライン施設により原油を輸送する部分があることより, 流水期における海中からの原油流出リスクが現実のものとなってきた¹⁾。しかし氷海において油流出事故が起こった場合の対策については, 技術開発があまり進んでいないのが現状である。

1997 年冬に島根県沖で発生したナホトカ号事故においては, 氷海域ではないものの冬期日本海の厳しい条件下のため, バキューム式など既存の回収方法の多くが無効であるか著しく効率が低下した。その一方で, ガット船などによるクレーンバケットを用いて掴み取る方法は, ある程度の波浪条件のもと, および高粘度化した流出油に対して非常に有効であったことが報告されている²⁾³⁾。しかし, 油とともに

多量の海水も採取されたため, 陸上への輸送回数が増え, 一時貯蔵用ピットの容量増大も余儀なくされた。また, 廃棄物処理に伴う費用の高額化といった問題も生じた。

本研究は, バケットによる海上流出油の回収をより有効に行うため, 採取された油と海水から海水のみを排出して油の比率を増大させる方法を開発するものである。これまでの研究により, バケット採取した油と海水を, 底面に排水孔を設けた水路を流下させることにより, 採取された油と海水から海水のみを排出して油の比率を増大させるシステムを提案し, システムの基本的な水理特性について検討してきた⁴⁾。これらをもとに, 本研究はより実際の作業条件を想定して, 断続流に対する装置の水理特性を検討し, 具体的な装置機構の形状・規模を明らかにすることを目的として実施した。

2. 流出油と海水の連続分離システム

原油など多くの油の比重は海水よりも小さく, 流出油は海面を浮遊する。冬期オホーツク海における温度条件においても同様で, バケットで採取した油と海水をタンク等に貯留すると 2 層に分かれた状態になる。この状態で水路を流下させると, 下層は海

水、上層は油分が流れる。この水路に排水孔を設けることによって、水は排水され、水路下流端からはわずかの水分のみを含む油が回収される(図-1)。水路断面には、船体のローリング動揺対策として円形断面を使用している。

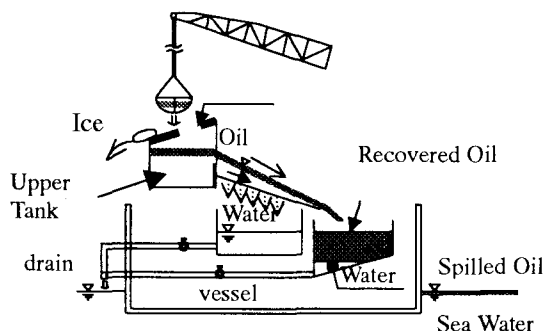


図-1 油・海水分離装置

この油・海水分離機構について、一樣断面開水路の真横から流出 q^* があって水路流量 Q が水路延長方向に変化する⁹⁾場合を考えてモデル化を行った。開水路において底面から流出がある場合の連続の式は(1)式となる。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -q^* \quad (1)$$

ここに Q は水路を流れる流量、 q^* は単位長さあたりに水路底面から排水される流量を示す。図-2 に連続分離システムの水利モデルを示す。水路長方向の微小区間 dx に関する運動量の式は(2)式となる。

$$\frac{dh}{dx} \cos \theta + \alpha \frac{d}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right) = \sin \theta - \frac{n^2 Q^2}{R^{4/3} A^2} + \frac{\alpha Q q^*}{g A^2} - \frac{q^* w \cos \beta}{g A} \quad (2)$$

$$\beta \approx \frac{\pi}{2} \rightarrow w \cos \beta \approx 0 \quad (3)$$

水路から排出される流れの方向を水路直角方向とみなし(3)式を得る。これと(2)式より、(4)式を得る。ここに、 A :水路を流下する通水断面面積、 C :流量係数、 g :重力加速度、 h :水路上の水深、 n :水路底面の粗度係数、 R :径深、 s :通水断面の潤辺長、 V :水路を流下する流速、 w :水路底面の排水孔から流出する流量、 α :運動量の係数、 ε :底面の開孔率、 θ :水路の傾斜角度である。

$$\therefore \frac{dh}{dx} = \frac{\sin \theta - \frac{n^2 Q^2}{R^{4/3} A^2} + \frac{(1+\alpha) Q q^*}{g A^2}}{\cos \theta - \frac{\alpha Q^2}{g A^3} \frac{\partial A}{\partial h}} \quad (4)$$

の排水量は(5)式となる。ここに、 l :水路部材の厚さ、 r :水路断面の内径、 s :通水断面の潤辺長である。さらに、径深 R と水深 h の関係は(6)式・(7)式にて得られる。(5)、(7)式を用いて(4)式を変形し、水面形の基本式(8)を得た⁹⁾。

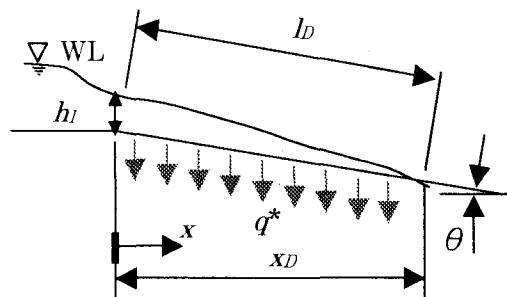


図-2 底面から流出のある水路モデル

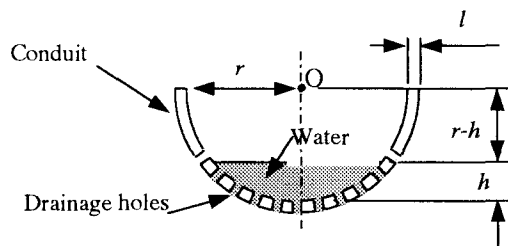


図-3 水路断面と記号

$$-\frac{dQ}{dx} = q^* = \varepsilon C \cdot s \cdot \sqrt{\frac{2g(h+l)}{\cos \theta}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial h} = \frac{r}{\sqrt{1-(1-\frac{h}{r})^2}} + \frac{r(r-h)}{h \sqrt{\frac{2r}{h}-1}} + h \sqrt{\frac{2r}{h}-1} - (r-h) \sqrt{\frac{2r}{h}-1} \quad (6)$$

$$R = \frac{\frac{\pi r^2}{2} - h(r-h) \sqrt{\frac{2r}{h}-1} - r^2 \sin^{-1} \left(1 - \frac{h}{r} \right)}{2r \cos^{-1} \left(1 - \frac{h}{r} \right)} \quad (7)$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\sin \theta - \frac{Q^2 n^2}{R^{4/3} A^2} + \frac{(1+\alpha) Q \varepsilon C \cdot s \cdot \sqrt{\frac{2g(h+l)}{\cos \theta}}}{g A^2}}{\cos \theta - \frac{\alpha Q^2}{g A^3} \frac{\partial A}{\partial h}} \quad (8)$$

$$E = h + \frac{Q^2}{2gA^2}, \quad Q = 2gA^2 \sqrt{E-h} \quad (9)$$

$$h=h_1 \text{ and } E=E_0 = h_1 + \frac{Q_1^2}{2gA_1^2}, \quad \text{at } x=0 \quad (10)$$

また図-3 に示す水路断面において、単位長さあたり

水面形の式(8)において、流量を(9)式にて比エネルギーで表し、水路入り口における境界条件(10)式を与えて、数値積分することにより、水面形および全ての水が排水される水路距離 x_D を計算することができる。実際の計算では、水路入り口水深および水路底面から流出する流れの流量係数は、実験により求める。

これまでの研究により、一定流量条件下では、すべての水が排水される水路距離 x_D は流入量の増大にしたがい、また水路傾斜角の増大にしたがって増大する。このことより、水路距離は水路への流入量と水路の傾斜角によって制御できることがわかっている⁹⁾。図-4 に、水路断面の内径 0.28m、空隙率 $\varepsilon = 0.57$ 、水路部材厚 0.01m、排水孔径 5mm の条件で実施した実験の結果を示す⁹⁾。図-5 に水理モデルと実験値との比較結果を示す。

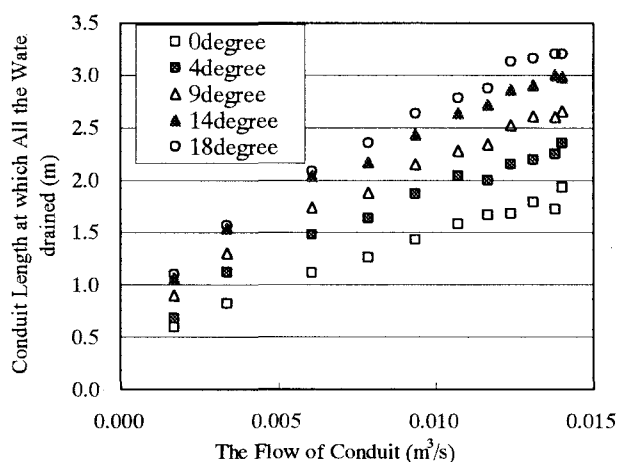


図-4 分離装置モデルの水路距離と流量 (定常流)

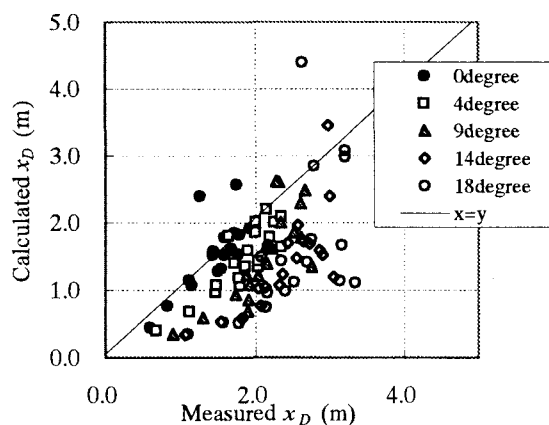


図-5 実験値と水理モデルの比較

水路勾配が 4° 以下の場合、計算値と実験値は比較的良好に一致するが、水路勾配が大きくなるにつれ

て計算値との誤差が大きくなる。また全ての水が排出される水路距離の計算値は、実験値よりも小さくなる傾向を示している。

3. 断続流による水理実験

(1) 実験方法

バケットによる実際の流出油回収作業においては、断続的に油と海水が装置の中に供給される。実験ではこのような流量不連続となる状況を想定した2つの供給ケースを実施し、油・海水分離装置の水理特性を確認した。実験装置の概要を図-6 に示す。

実験装置は図-4 に示した定常流での実験と同様に、内径 28cm、厚さ 1.0cm の塩化ビニール製半円形パイプ (長さ 5.0m) を水路模型として使用した。水路には直径 0.5cm、間隔 2.0cm、正3角形配置の排水孔を設け、空隙率 ε は 0.57 とした。水路は上部タンクと下流側タンクの間に傾斜を与えて接続してある。まず、case1 として 50, 70, 90l の水を一度に上部タンクに供給し、定点での水深変化および最遠到達距離等を計測した。水路の勾配は $0, 4, 9, 14, 18^\circ$ とした。上部タンク内には水流を一定にするためにスクリーン板を入れてある。

つぎに、case2 として、水路入り口を堰き止め、タンク内に 90, 100l の水を貯留した後、堰を抜き取って水路に水を流した場合について、水路勾配 $0, 9, 14^\circ$ で定点での水深変化および最遠到達距離等を計測した。

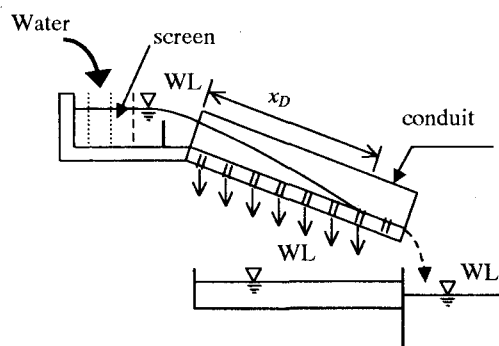


図-6 実験装置

最後に、油を混入したケースについて、case2 の実験条件において、水 90l に対して油 1l を混入して行い、分離状況を確認した。このときの水路勾配は 14° とした。油は水海域での温度状況を想定し、ISO 粘度グレード 220 のギアオイルを着色したものを使用した。実験時のギアオイルの粘度は約 $450 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 、比重は 0.904 程度である。

(2) 断続流の実験結果

図-7, 図-8 に水路入り口部分の水深の時間変化を示す。

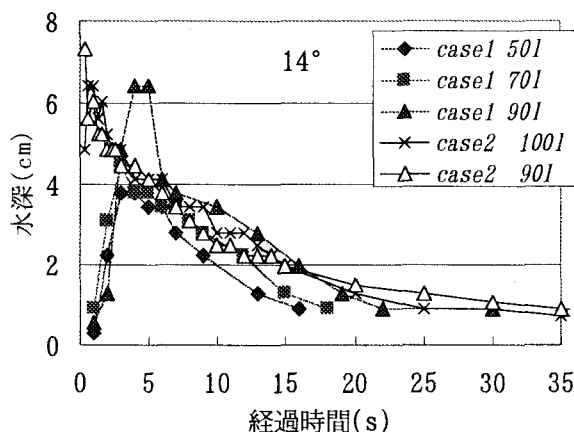


図-7 水路入り口水深の時間変化 (14°)

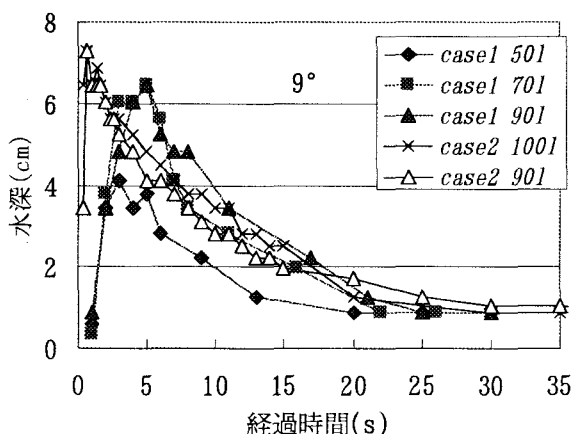


図-8 水路入り口水深の時間変化 (9°)

水路入り口部分の水深は, 水投入とともに急激に増大し, 約 5s でピークとなった後に減少した. 最大水深は水路勾配が小さいほど大きくなり, 9° では, 投入水体積に対して上部タンク平面積より算出した平均水深の約 70%程度となった. 上部タンクの平面積は 88×92cm である. また, 堰を決壊させたケースにおいては, 約 0.7s でピークとなり, 最大水深は水路勾配には影響を受けなかった.

図-9 に, 水路内の流れの最遠到達点と, 投入水体積を上部タンク平面積で除したタンク内平均水深の関係を, 図-10 に水路内の流れの最遠到達点と水路入り口のピーク水深の関係を示す. 両図とも, 図-4 に示した定常流による実験結果を併記してある.

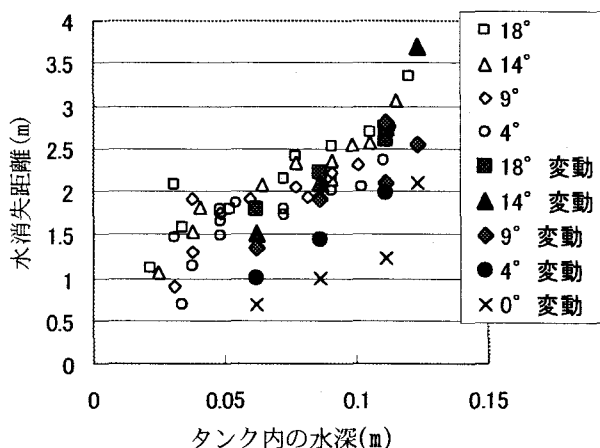


図-9 タンク内平均水深と水路距離

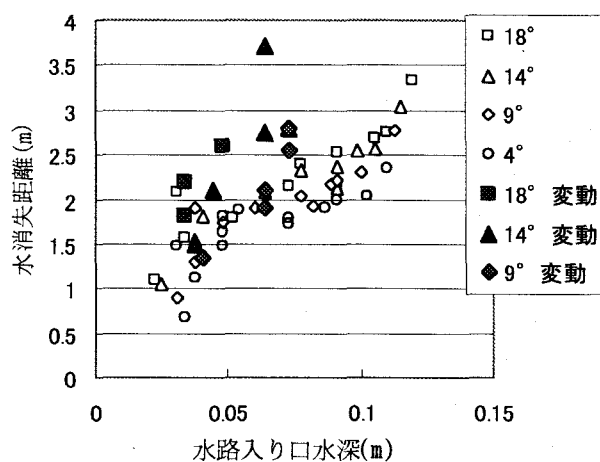


図-10 水路入り口水深と水路距離

水路上における水流の最遠到達点は, 水路勾配に比例して大きくなり, 定常流の場合と同様の傾向を示す. しかし, 投入水体積および上部タンクに貯留した水の体積をタンク平面積で除した上部タンク内平均水深に対する水路距離の関係は, 定常流における入り口水深に対する水路距離の場合に比べて全般に短くなる結果となった. またその程度は, 勾配が 9° 以上では比較的近似しているものの, 水路勾配が小さいほど差が大きくなった.

一方で, 水路入り口水深に対する水路距離の関係は, 定常流の場合に比べて全般に水路距離が大きくなり, その程度は勾配が大きいほど顕著となった. ただし勾配 9° では, 定常流の場合とほぼ近似できる程度となった. 以上より本実験における水路諸元では,

- 1) 水路勾配が 9° 以下の場合では, 流量に応じて, 定常流に対する水路距離の関係をを用いて装置の諸元を検討することができる.
- 2) 水路勾配が 9° よりも大きな場合は, 投入水量から算出されるタンク内平均水深を用いて水路距離を推定することができる.

と考えられる。

(3) 油投入実験

最後に、油を投入したケースでは、水路底面から油が流れ出す範囲を確認した結果、およそ上流端から約 60cm の地点から下流で油の流出を確認した。また、水路長 120cm より上流側と下流側からの油排出量がほぼ同程度であった。ただし実験に用いた油量が少ないため、定量的に計測することはできなかった。

油が短い距離で排出された原因は、上流端の水深が数 cm オーダーであり、水路内の流れの水深はさらに小さいため、油が早い時点で排水孔から流れ出したためと考えられる。また、水路内の水流は、初めピーク水深に達した後は時間とともに水位が低下し、到達距離もそれに伴い低下する。そのため、油が水路下流端に達せずに排水孔より流下する。

また、今回の実験は油と水がタンク内で 2 層に分離した状態を想定したものであり、バケットで水と油を投入するような状況においては、油は水面に浮いた状態ではなく、水中に浮遊している。こういった状況で水路に流すと、水路底面から排水した水は多くの油を含有してしまう結果となることが予想される。

油を効率良く下流端へ流下させるためには、水路へ流入する以前に油が完全に水面に浮遊した状態、初期の水流に乗せて一気に下流端へ運搬する必要がある。また、水路の必要長は水流の最大到達距離よりも小さくする必要がある。さらに、水路へ水と油を供給するホッパーについても、その形状を検討していく必要があると考えられる。

4. 油水連続分離システムの試算

以上の結果を元に、実際の油・水連続分離システムの諸元と処理能力について試算する。いま、199DWT ガット船を想定して、クレーンバケット容量を 1.0m^3 と仮定する。1 回あたりの油・水投入量は、バケット容量の 80% とし、このうち油・水の比率は 2:8 (20% が油) と仮定する。クレーンのサイクルタイムは約 60s であることから⁷⁾、余裕をみて 40s 以内に 1 回投入分の油水処理を行うものとする。従って必要な平均流量は、

$$Q^*=1.0 \times 0.8 \times 0.8 = 0.016 (\text{m}^3/\text{s})$$

$$V=1.0 \times 0.8 = 0.8 (\text{m}^3/\text{サイクル})$$

となる。水路を 2 連として、水路の諸元を実験装置と同じ直径 0.28m 、勾配 14° とすると、定常流に対する図-4 から $Q^*=0.016/2=0.008$ に対して最大水路長約 2.5m を得る。

上部タンク形状は、クレーンバケットを開いた範囲を想定して $2.5^L \times 2.0^B (\text{m})$ とすると、上部タンク内の最大水深は、

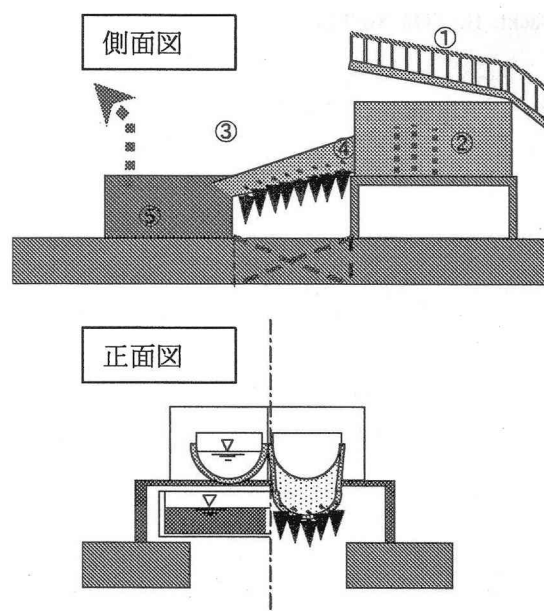
$$h_{\max}=1.0 \times 0.8 \times 1/(2.5 \times 2.0) = 0.16 (\text{m})$$

と想定される。一方、図-9 より勾配 14° で水路距離 2.5m 時のタンク内平均水深は約 0.12m となる。また、

円形水路の最大水深は 0.14m であることより、わずかに水路上面より水・油が溢れ出す程度が想定される。これに対しては、水路側壁を深くするなどの処理にて解決することが可能である。

ただし、下流側タンク近傍まで適切な流量の水流が存在しないと、油が水路底面の排水孔から流下してしまう。実験結果に対して水路入り口水深が約 2 倍あることを参考に、水路長は 1.2m 程度とすることにより、水深不足で油の回収効率低下を防止する。以上より、直径 0.28m 、長さ 1.2m 、勾配 14° の円形断面水路 2 連にて、1 サイクル (60s) あたり 0.8m^3 の油水分離処理を行うシステムを想定した。

実作業時における投入水量の変動に対しては、水路勾配を投入水量に応じて動的に制御することで、より合理的な処理が期待できる。図-13 に、システムの概念図を示す。



- ①スクリーン (氷片、障害物等の除去)
- ②上部タンク (バケット容量と投入時水深・水路流量・サイクルタイムより決定)
- ③水路 (凍結防止ヒーター、流量監視)
- ④水路勾配制御装置 (バケット容量、サイクルタイム等の条件変動に対応)
- ⑤油タンク・送油ポンプ (本船の貯蔵タンクに回収油を送る)

図-13 油・海水分離システム概念図

5. 結論

以下に本研究の結論を列記する。

- 1) 底面に排水孔を設けた水路上の断続的な水流の最遠到達点は、水路勾配が大きくなるほど大きくなり、定常流の場合と同様の傾向を示した。
- 2) 本実験条件では、水路勾配が 9° 以下の場合では、水路入り口の最大水深を、定常流に関する流量および水路入り口水深と水路距離の係数に当てはめて装置の諸元を検討することが可能である。

- 3) 水路勾配が9° よりも大きな場合は、投入水量から算出されるタンク内平均水深を、定常流に関する流量および水路入り口水深と水路距離の関係に当てはめて装置の諸元を検討することが可能である。
- 4) バケットで投入された油と水は混合した状態にあるので、水路に水と油を供給するホッパーについても検討が必要である。また、水路下流端の直前まで油を運ぶだけの流量を保つことも必要である。
- 5) 以上の結果をもとに、199DWT ガット船に装備された 1.0m³ バケットを想定して、実際の油・海水分離システムの諸元を試算した。実験結果に対して水路入り口水深が約 2 倍あることを参考に、水路長は 1.2m 程度とすることにより、水深不足で油の回収効率低下を防止することが可能である。

参考文献

- 1) Kanaami, K., Kondo, H., Otsuka, N., Tomatsu, S. and Saeki, H., "Oil Spill Scenario in The Sea of Okhotsk", Proc. of The 18th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, pp.205-209, 2003.
- 2) 海洋工学研究所編：重油汚染・明日のために，pp.401-404，1998.
- 3) Proceedings of International Symposium on Marine Oil Spill Response, Editor: Seizo Matora et al. 1997, Tokyo
- 4) 大塚夏彦，萩原浩二，金編康平，高橋伸次郎，佐伯浩：流出原油と海水の連続分離システムに関する実験的研究，土木学会海洋開発論文集，VOL.17，pp.105-110，2001.
- 5) Ven Te Chow:開水路の水理学（石原藤次郎訳），丸善株式会社，pp.310-312，1961.
- 6) 金編康平，大塚夏彦，萩原浩二，佐藤典之，佐伯浩，円形水路を用いた水と流出油の連続分離システム，第 17 回寒地技術シンポジウム，pp.329-333，2001.
- 7) 高橋伸次郎，米田克幸，大島香織，大塚夏彦，佐伯 浩，流出した原油の回収に関する基礎的実験，土木学会海洋開発論文集，Vol.15，pp.553-557，1999.