タンク洗浄について*

上 田 浩 一**

Tank Cleaning

By Koichi Ueda

The discharge into the sea of tank washings of the chemical tanker shall be prohibited except when the regular conditions are satisfied. It is decided by THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973 AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO (MARPOL 73/78) and the concerned domestic law. Concerning hazard liquid substances, the effluent from the tank washing operation shall be discharged to a reception facility at least until the concentration of the substance in the discharge has fallen to the residual concentration specified for the substance.

Therefore it is necessary for the estimation of the amount of the needed water that the relation between the residual concentration and the amount of the used water is grasped. It is investigated using a model tank and the amount of the water for tank washing is estimated by the results.

1. ま え が き

有害液体物質を輸送するケミカルタンカーに発生するタンク洗浄水の船外投棄は国際的には「⁽¹⁾1973年の船舶による汚染防止のための国際条約に関する1978年の議定書」(MARPOL 73/78条約)により、国内的には「⁽²⁾海洋汚染および海上災害の防止に関する法律(昭和58年5月改正)」により規制される。有害性の強い物質に対しては洗浄水を連続的に陸上受入施設に排出しながら洗浄作業を行い、その排出洗浄水中の物質残存濃度が規定値に低下するまで洗浄を続けること、あるいはそれに相当する主官庁および条約によって承認された方法で洗浄した後、ある一定の条件下で洗浄水の船外投棄が認められている。それ以外の物質に関しても有害性に応じて洗浄方法が規定されている。そこでタンク洗浄中の使用洗浄水量と洗浄中の物質残存濃度の関係を把握しておくことが必要洗浄水量を推定するために必要である。洗浄水中の物質残存濃度はタンク内残液量と洗浄中タンク内に滞留する量に左右されると考えられる。タンク内残液量と洗浄中タンク内に滞留する量に主として模型タンクを使用して洗浄効果を調べ、これらの結果を基に必要洗浄

水量を推定した。

2. タンク洗浄の考え方

現在使用されているタンク洗浄機は比較的水量の多いノズル(7mmφ, 6mmφ程度以上)で2~5 kg/cm²の水圧で使用されているので、初期に壁面付着量の大部分が底部へ流される。したがってタンク内の洗浄水と残存物質は、ほぼ底部のたまりでほぼ一様に混合されると考えられる。また排出ポンプの能力(排出量)が洗浄機の使用水量より大きく、洗浄機の使用水量で定常状態となる。(図1参照)記号は次のようにする。

Q : 洗浄に使用した水量(m³), C : 洗浄排水中の濃度, Q_{RES} : 初期の残液量, Q_{DH} : 洗浄中のタンク内滞留量(m³), α : 単位時間当りの、排出水量の洗浄水量に対する割合

洗浄中の排出水の濃度は次のようになる。

(i) 洗浄中にタンク内に滞留する水量がタンク内に付着残留する液量より多いとき、すなわち $Q_{DH} \geq Q_{RES}$ のとき

この場合で洗浄初期の $Q \leq Q_{DH} - Q_{RES}$ のときは

$$C = \frac{Q_{RES}}{Q_{RES} + Q}$$

それ以後の $Q \geq Q_{DH} - Q_{RES}$ のときは

$$C = \frac{Q_{RES}}{Q_{DH}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{Q_{DH}}(Q - Q_{DH} + Q_{RES})\right\} \quad (1)$$

* 原稿受付 昭和62年10月21日

昭和62年春季学術講演(昭和62年5月28日)

** 正会員 船舶技術研究所(三鷹市新川6-38-1)

図1 洗浄モデル

となる。この時の洗浄時間とタンク内滞留水量との関係を図2(a)に、洗浄水量と洗浄排水の濃度を図2(b)に示す。

図2 タンク洗浄時のタンク内滞留量と洗浄排水の濃度
(タンク内の洗浄中の滞留量が付着残液より多い場合)

(ii) 洗浄中にタンク内に滞留する水量がタンク内に付着残留する液量より少ないとき、すなわち $Q_{DH} \leq Q_{RES}$ のとき

この場合で洗浄初期の $Q \leq \frac{Q_{RES} - Q_{DH}}{\alpha - 1}$ のときは

$$C = \left(\frac{Q_{RES} - (\alpha - 1)Q}{Q_{RES}} \right)^{\frac{1}{\alpha - 1}}$$

となる。それ以後の $Q \geq \frac{Q_{RES} - Q_{DH}}{\alpha - 1}$ のときは

$$C = \left(\frac{Q_{DH}}{Q_{RES}} \right)^{\frac{1}{\alpha - 1}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{Q_{DH}} \left(Q - \frac{Q_{RES} - Q_{DH}}{\alpha - 1} \right) \right\}$$

この時の洗浄時間とタンク内滞留水量の関係を図3(a)に、洗浄水量と洗浄排水濃度の関係を図3(b)に示す。

図3 タンク洗浄時のタンク内滞留量と洗浄排水の濃度
(タンク内の付着残液量が洗浄中の滞留量より多い場合)

3. 実験装置および実験方法

模型タンク実験装置を図4の(i)に示す。トリムおよびヒールを 2° として供試液および洗浄水がウエルへ流れやすいようにした。洗浄中のタンク内滞留量は、ウエル底面と吸引パイプ間が42mmの時約20ℓで、滞留量を多くする場合にはその間隔を長くした。排水ポンプは初期残留量が少ないので、吸引可能なギアポンプを使用した。壁面の除去実験ではタンクの2m×2m面を開放し、ノズルから所定の距離のところに1.5m×1.5mの供試板を設置し、供試板に供試液を付着させ、ある時間洗浄後に供試板の付着液を洗浄回収し、回収液の濃度と量を計測して洗浄後の付着残量を求めた。実験開始時のノズルの方向は供試板に平行かつ水平方向とし、ノズルの位置

表 1 供試洗浄機の周期

水 圧	垂直軸回りの 回転周期	水平軸回りの 回転周期
0.5 kg/cm ²	46.35 秒	46.05 秒
1.0 kg/cm ²	33.25 秒	32.85 秒
1.5 kg/cm ²	27.6 秒	27.1 秒
2.0 kg/cm ²	23.9 秒	23.45 秒
2.5 kg/cm ²	21.5 秒	21.05 秒
3.0 kg/cm ²	20.75 秒	20.0 秒

(a) 模型タンク実験装置

(b) 走査およびスポット洗浄実験装置

図 4 実験装置

は供試板側とした。ノズルの回転速度を表 1 に示す。走査およびスポットの洗浄効果を調べる実験には図 4 の(b)

に示す実験装置を使用した。供試液としては赤色色素添加したエチレングリコール、赤色色素添加したグリセリン、食塩水、B 重油等を使用した。赤色色素を添加した供試液は分光光度計（波長 525 nm）を使用した検量線を作成し、濃度を求めた。食塩水使用の場合約 10% の濃度を原液（ $C=1$ ）として使用したため、水道水のイオン等の影響の出る濃度 $C=0.001$ （食塩水の濃度で 0.01 %）より薄い時はその影響が出る。B 重油は CCl_4 抽出により赤外分光光度計で濃度測定を行った。

4. 実験結果

洗浄中のタンク内滞留水量 Q_{DH} を変えた場合の洗浄について食塩水を使用した実験結果を図 5 に示す。図 5 の実線は初期残留量 $Q_{RES} = 0.020 \text{ m}^3$ 、 Q_{DH} をそれぞれの実験条件の値を用いてタンク内の洗浄水の濃度が均一に混合されるとして計算したものである。図 6 は初期残留量を変えた場合の実験結果で、いずれの場合も洗浄排水濃度 C が 10^{-4} より小さい時は水道水のイオンの影響が出ていたので、それを除くとほぼ計算式に沿って洗浄さ

図 5 Q_{DH} を変えた場合の洗浄（水の粘性係数は $1.3 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ）

図6 Q_{RES} を変えた場合の洗浄

れていると考えられる。

初期残液量 Q_{RES} が洗浄中のタンク内滞留量 Q_{DH} より多い場合の実験結果を図7に示す。この場合は供試液として色素添加のエチレングリコールを使用している。図中の α は定常状態になる前の単位時間当りの排水ポンプ水量の洗浄水量に対する割合で、実線は $Q_{DH} = Q_{RES} = 0.024 m^3$ として計算したものと、 $Q_{DH} = 0.024 m^3$ 、 $Q_{RES} = 0.038 m^3$ 、 $\alpha = 1.37$ として計算したものである。この場合もほぼ計算式に沿って洗浄されている。

初期濃度を変えた場合についてエチレングリコールに

色素を添加した供試液を用いた実験結果を図8に、食塩水を用いた実験結果を図9に示す。供試液を変えた場合の実験結果を図10に示す。比重の大きい CCl_4 、粘性の低い食塩水は初期残液量を同量にした場合、壁面に付着している量よりウェルに貯る量が多いので早く除去されている。B重油は粘性が高く非水溶性であるので洗浄除去され難い。

壁面に付着した供試液とウェルに貯った供試液の洗浄除去状況を調べるために、図11に初期散布量をウェルと壁面に5ℓとした場合、ウェルのみに3.75ℓ散布した

図7 残液量の多い場合の洗浄

図8 初期濃度を変えた場合の洗浄（供試液：エチレングリコール＋色素）

図9 初期濃度を変えた場合の洗浄（12%の食塩水の濃度を1としている）

場合、壁面のみに1.25ℓを散布した場合の洗浄実験結果を示す。ウェル部の残液は早く除去される。

高粘性水溶性物質としてグリセリンを使用した場合の実験結果を図12、13に示す。図12は秋期、図13は冬期の実験である。図12から壁温の影響が大きいことが考えられる。図13で83℃の温水の場合に60℃の洗浄効果より低下している。蒸気のために目視はできなかったが洗浄の音の状態より高温水による洗浄機の膨張のために洗浄機の作動状態が悪くなって影響が出たと考えられる。図14では高粘性非水溶性物質の水および温水洗浄効果が悪いことがわかる。図4のタンクの一面を開放し、1.5m

×1.5mの供試板にグリセリンおよびB重油を付着させ洗浄効果を調べた結果を表2に示す。洗浄機への水圧は1.0kg/cm²で、ノズルと供試板の間隔は5mである。この洗浄試験を行った時の洗浄軌跡の例を図15に示す。表3では供試板にエチレングリコールを付着させ洗浄実験を行った結果を示す。エチレングリコールはほとんど除去されている。表4に図4の(b)の実験装置を使用して冬期にスポット洗浄を5秒間行った結果を示す。表5に凝固性物質であるパラキシレンを使用して温水で走査洗浄した結果を示す。溶解により除去される量は少ない。

図10 供試液を変えた場合の洗浄

図11 各部の残液量の除去状況

5. 考 察

エチレングリコールのような水溶性の物質が付着したタンクを現在使用されているような口径の大きい(6mmφ程度以上)洗浄機で洗浄する場合はタンク内を一樣に定常的に洗浄すると仮定し計算しても洗浄水の濃度は比較的实验値と合致している。したがってタンク内の残留液と洗浄水が一樣に混合し定常的に洗浄されるとして、タンクの洗浄排水の濃度が C_E になるまでの必要洗浄水量を求めると次のようになる³⁾。

(1) 洗浄中タンク内に滞留する水量がタンク内に残留す

る液量より多いとき

$$Q_{DH} \geq Q_{RES} \text{ のとき}$$

Q_{DH} : 洗浄中にタンク内に滞留する水量 (m^3)

Q_{RES} : タンク内に残留する液量 (m^3)

$$1) C_E \geq \frac{Q_{RES}}{Q_{DH}} \text{ のとき}$$

C_E : 濃度 ($C_E = 1$ は 100% を意味する)

$$Q_E = \frac{Q_{RES}}{C_E} - Q_{RES} \quad (2)$$

Q_E : 必要洗浄水量 (m^3)

図12 グリセリンを使用した模型タンク洗浄試験結果 (秋期)

図13 グリセリンを使用した模型タンク洗浄試験結果 (冬期)

2) $C_E \leq \frac{Q_{RES}}{Q_{DH}}$ のとき

$$Q_E = Q_{DH} - Q_{RES} - Q_{DH} \ln \left(\frac{Q_{DH} \cdot C_E}{Q_{RES}} \right) \quad (3)$$

(2) $Q_{DH} \leq Q_{RES}$ のとき (ほとんどの場合, (1)が適用されると考えられる.)

1) $C_E > \left(\frac{Q_{DH}}{Q_{RES}} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}$ のとき

$$\alpha = \frac{F_D}{F_W} \div 1.1$$

F_W : 単位時間当りに洗浄機よりタンク内に入る

水量 (m³/h)

F_D : 単位時間当りにタンクから排出される水量 (m³/h)

$$Q_E = \frac{Q_{RES} (1 - C_E^{\alpha-1})}{\alpha - 1} \quad (4)$$

2) $C_E < \left(\frac{Q_{DH}}{Q_{RES}} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}$ のとき

$$Q_E = -Q_{DH} \ln \frac{C_E}{\left(\frac{Q_{DH}}{Q_{RES}} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}} + \frac{Q_{RES} - Q_{DH}}{\alpha - 1} \quad (5)$$

図14 B重油を使用した模型タンク洗浄試験結果

表2 洗浄機による1.5m×1.5m供試板の試験結果

壁温	洗浄水温度	水 圧	供 試 液	洗浄後の付着量	除去率
9℃	11.5℃	1.0 kg/cm ²	B	126 ml	39 %
5.5	72	1.0	B	70	66 %
8.5	11.0	1.0	グリセリン	1.7	99 %
12	63	1.0	グリセリン	0.97	99.6 %
供試液がB重油の付着量：205 ml					
供試液がグリセリンの付着量：223 ml					
ノズル供試板間距離：5 m					

ここで $\alpha \div 1.1$ とした理由を述べる。通常洗浄機の使用水量は $9 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度で、排出にはカーゴポンプが使用されており、カーゴポンプの能力は $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度であり、ポンプ能力では $\alpha = \frac{F_D}{F_W} \div 22$ 程度であるが、タンク洗浄時のタンク内の水は少なく、最後の浚え状態であるので、 $\alpha \div 1.1$ 程度になっていると考えられる。⁴⁾実験例から、 α を推定した例を図16に示す。

タンク内に残留する残量 Q_{RES} について

$$Q_{RES} = Q_H + Q_{SI} \text{ (m}^3\text{)}$$

Q_H ：付着量 (m³) (IMO⁵⁾の式による)

$$Q_H = 1.1 \times 10^{-4} A_d + 1.5 \times 10^{-5} A_w + 4.5 \times 10^{-4} L^{\frac{1}{2}} A_b \quad (6)$$

図15 グリセリンの水洗浄の洗浄軌跡

A_b ：タンク底およびタンク構造物の上向き水平部の面積 (m²)

A_d ：甲板裏およびタンク構造物の下向きの水平部の面積 (m²)

A_w ：タンク壁およびタンク構造物の垂直部分の表面 (m²)

L ：タンクの長さ (m)

Q_{SI} ：ウエル部の残量 (m³)

表6に示す46個の形状の異なるタンクについて Q_H を計算し、べき乗回帰計算によりタンクの体積 V と Q_H の関

表3 除去効果実験結果

(ノズル $7\phi \times 2$, 供試板 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$)

供 試 液	壁 温	ノズル供試板距離	水 圧	初期付着量	洗浄後付着量	残 存 率
エチレングリコール	19℃	3.5 m	5 m	23 cm ³	≈ 0	≈ 0
エチレングリコール	20℃	3.5 m	7.5 m	23 cm ³	$3.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$	1.6×10^{-4}
エチレングリコール	17.2℃	5 m	7.5 m	23 cm ³	$1 \times 10^{-2} \text{ cm}^3$	4×10^{-4}

表 4 高粘性物質のスポット洗浄実験結果

壁 温	ノズル径	水 圧	洗浄水温度	洗浄の中心	残留量	除去率	使用水量	除 去 量 使用水量
13.8℃	1 φ mm	3.65 kg/cm ²	74.5℃	上から 28 cm	33 cm ³	35 %	0.088 l	0.20
9.0	2	1.6	77.0	23	25	51	0.26	0.10
10.5	4	2.3	78.5	29	28	45	1.2	0.019
12	4	2.4	11.8	28	28	45	1.3	0.018
9.5	8	1.25	79	42	6.4	87	3.8	0.0091

供試板の大きさ：80 cm × 80 cm 初期付着量：51 cm³
供試液：グリセリン + 0.5 % 赤色素
洗浄時間：5 秒
ノズル供試板間距離：5 m

表 5 凝固性物質の走査洗浄実験結果

壁 温	ノズル径	水 圧	走査回数	洗浄水温度	洗浄の中心	初期付着量	除 去 量	除 去 率
2.2℃	4 φ mm	2.35 kg/cm ²	1	77.6℃	上から 40 mm	2.3648 kg	0.0005 kg	0.02 %
2.2	4	2.35	2	77.6	40	2.3538	0.0045	0.19 %
9.0	4	2.35	4	79.0	170	2.4008	0.1935 (全体が剥離)	8.1 % (100 %)
9.0	4	2.35	8	79.0	170	2.3713	0.3040	12.8 %
6.2	8	1.0	1	73.5	210	2.1803	0.1050	4.8 %

供試液：パラキシレン 供試量：2.5 l
供試面の大きさ：61 cm (たて) × 41 cm (よこ)
ノズル供試板間距離：5 m 走査速度：6°/s

図16 α の推定

係は次の近似式で表わされる。

$$Q_H = 1.96 \times 10^{-3} \times V^{0.671} \quad (7)$$

V ：タンク体積 (m³)

この関係を図17に示す。

洗浄中にタンク内に滞留する量 Q_{DH} について

(3)式において必要洗浄水量を得るためには Q_{DH} を求める必要がある。洗浄ノズルが回転しているため、 Q_{DH} は多少変化していると考えられるが、平均的滞留している量を図18のようにモデル化し計算し推定した。

$$Q_{DH} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (m^3) \quad (8)$$

表6 タンク形状

番号	本 船 の 総 トン 数	タンク の 寸 法 (m)			タンク 容 積 (m ³)	タンク の L × B × D 比	備 考
		L	B	D			
1	模型タンク	4.00	2.00	2.00	8.0	2: 1: 1	Center B ^{HD} " 型
2	96.56	6.00	3.60	2.50	53.0	24:14:10	
3	96.56	8.50	3.60	2.50	76.5	34:14:10	
4	99.77	8.00	3.25	2.90	77.0	28:11:10	
5	99.77	8.50	3.25	2.90	83.0	29:11:10	
6	198.86	9.40	4.00	3.30	106.8	28:12:10	
7	213.42	8.80	4.00	3.30	115.2	27:12:10	
8	213.42	9.60	4.00	3.30	122.3	29:12:10	
9	198.86	9.85	4.00	3.30	123.8	30:12:10	
10	410.0	9.15	4.70	3.10	149.5	30:15:10	
11	497.0	8.45	5.00	3.45	156.3	25:15:10	
12	410.0	9.60	4.70	3.10	159.2	31:15:10	
13	497.0	9.00	5.00	3.45	165.2	26:15:10	
14	498.0	8.95	5.00	3.40	169.2	26:15:10	
15	498.0	9.40	5.10	3.20	178.3	29:16:10	
16	649.81	10.00	5.00	3.60	199.8	28:14:10	
17	649.81	10.00	5.00	3.60	201.0	28:14:10	
18	1076.16	9.50	5.70	4.30	246.6	22:13:10	
19	1076.16	9.80	5.70	4.30	251.0	23:13:10	
20	999.08	10.00	5.80	4.50	273.7	22:13:10	
21	999.08	10.05	5.80	4.50	274.2	22:13:10	
22	2759.0	10.40	3.30	6.20	201.0	17: 5:10	2Long H ^d " 型
23	4943.0	8.40	3.525	8.20	248.0	10: 4:10	
24	4943.0	11.20	3.525	8.20	332.0	14: 4:10	
25	7145.0	9.00	4.75	9.71	381.0	9: 5:10	
26	2759.0	8.45	7.80	6.20	402.0	14:13:10	
27	2759.0	9.10	7.80	6.20	461.0	15:13:10	
28	7145.0	11.25	4.75	9.71	518.0	12: 5:10	
29	10804.0	5.76	11.20	10.31	666.0	6:11:10	
30	11700.0	11.52	5.80	10.25	690.0	11: 6:10	
31	10804.0	11.52	5.80	10.31	691.0	11: 6:10	
32	4943.0	8.40	10.15	8.20	747.0	10:12:10	Center B ^{hd} " 型
33	11700.0	16.32	5.80	10.25	976.0	16: 6:10	
34	4943.0	11.20	10.15	8.20	985.0	14:12:10	
35	11700.0	9.50	11.20	10.25	1100.0	9:11:10	
36	7145.0	11.25	10.50	9.71	1163.0	12:11:10	
37	13600.0	18.75	5.84	11.81	1300.0	16: 5:10	
38	10804.0	11.52	11.20	10.31	1353.0	11:11:10	
39	13600.0	23.52	5.84	11.81	1770.0	20: 5:10	
40	11700.0	23.04	11.20	10.25	2694.0	22:11:10	
41	13600.0	18.75	13.32	11.81	2990.0	16:11:10	
42	4259.0	13.00	9.10	6.80	817.0	19:13:10	Center B ^{hd} " 型
43	3802.0	14.30	8.25	6.90	831.0	21:12:10	
44	3802.0	14.28	8.25	6.90	843.0	21:12:10	
45	9088.0	15.00	10.50	9.70	1582.0	15:11:10	
46	9088.0	18.00	10.50	9.70	1853.0	19:11:10	

 Q_1 : 平均的に垂直面に滞留する量 (m³) Q_2 : 平均的に底面に滞留する量 (m³) Q_{S_2} : ウェル部に滞留する量 (m³)

$$Q_1 = \delta_1 \times b \times \frac{D}{2} \times N \quad (9)$$

 δ_1 : 平均的に垂直面で流下する水膜の厚さ (m) b : 平均的に垂直面で流下する水膜の幅 (m)

図17 タンク容積と付着残量の関係

図18 平均的な滞留状態

D : タンク深さ (m)

N : ノズルの本数

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{3q \cdot \mu_L}{r_L \cdot \sin \phi_1}} \quad (10)$$

q : 垂直壁面を流下する単位幅当りの流量 ($\text{m}^3 / \text{m} \cdot \text{s}$)

μ_L : 水の粘性係数 $= 1.02 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right)$

r_L : 水の単位体積当りの重さ $= 998 \text{ kg} / \text{m}^3$

ϕ_1 : 垂直壁の角度 $= 90^\circ$

$b = 4.3 r$

r : 噴流の垂直方向への広がり半径 (m)

この式については詳細に検討する必要があるが現在のところは図19の実験結果から用いた。

$$r = 149 \times M^{0.48} \times 10^{-3} \quad (11)$$

M : ノズル部の噴流の運動量 (kg)

この式についても詳細については検討する必要がある

が図20の実験結果から用いた、

$$M = \frac{\pi}{4} d^2 \rho v^2$$

ρ : 水の質量 $= 102 \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$

v : 噴流の速度 (m/s)

$$Q_2 = \delta_2 \times B \times L$$

B : タンク幅 (m)

δ_2 : 平均的にタンク底面を流れる水膜の厚さ

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{3Q \cdot \mu_L}{B \cdot r_L \cdot \sin \phi_2}} \quad (12)$$

Q : 単位時間当りの水量 (m^3 / s)

ϕ_2 : 底面の傾斜角 $= 2^\circ$

$$Q_{S2} = S \times (h_1 + 0.014) \quad (13)$$

S : ウェル部の面積

h_1 : 洗浄中の排水管下部とウェル底面との距離

ウェルがない場合には、洗浄中の排水管の下部から 1.4 cm 上まで貯る状態の時の水量。

1.4 cm は模型タンク実験の観察結果から求めた。

模型タンクにおいて、この式による計算結果による Q_{DH} の値と模型タンクにおいて洗浄用ポンプと排水ポンプを同時に止めて求めた Q_{DH} を比較すると表7のようになり、ほぼ Q_{DH} を計算により推定できる。

以上により Q_{DH} は計算できるが、煩雑になるので、通常使用されている洗浄機の水量と 45 個のタンクの例からべき乗回帰計算から $Q_1 + Q_2$ とタンク容積 V の関係は次の近似式で表わされ、図21のようになる。

図19 r と b の関係

図20 運動量と r の関係

表 7 Q_{DH} の計算値と実験値 (平均) の比較

計算

$$Q_{DH} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (0.68 + 12.8 + 2.28) \times 10^{-3} = 15.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

実験 (平均)

$$Q_{DH} = Q_{total} - Q_0 - Q_3 - Q_4 = (22.5 - 0.2 - 1.5 - 2.4) \times 10^{-3} = 18.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Q_0 : ノズルから壁までの水量 (計算) Q_1 : 垂直壁の平均的滞留量

Q_2 : 底面の平均的滞留量 Q_3 : ウェル部の滞留量

Q_{total} : 洗浄ポンプと排水ポンプを同時に止めた時のタンク内残留量

Q_3 : ポンプを止めた時の排水ポンプからのもどり量

Q_4 : 洗浄用ポンプを止めた時の洗浄ノズルからタンク内に流れた量

図 4 (a) の模型タンク実験による, 洗浄水量 $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ の時.

図21 タンク体積 V と Q_1+Q_2 の関係

以上の結果をまとめるとタンク容積 V と壁面部滞留量および壁面部付着量の関係はほぼ表8のようになり、例えば洗浄水の濃度が0.1% ($C_E=0.001$) になるまで洗浄するのに必要な水量 Q_E は表9のようになる。図22に Q_{DH} (洗浄中にタンク内に滞留する量)/ Q_{RESU} (タンク内の付着残留量)と Q_E (必要洗浄水量)/ Q_{RESU} (タンク内残留量)と洗浄水の濃度の関係を示す。

6. ま と め

現在使用されている洗浄機は使用水量が多く、水溶性のよい物質についてはタンク内は洗浄中にほぼ均一に混合されていると仮定して計算しても比較的良好と考えられ、これに基づいて必要洗浄水量を推定した。難水溶性の物質については温水洗浄等により水溶性の物質に近い状態にして洗浄するか、洗浄水量を多くする必要がある。

表8 タンク容積と洗浄中のタンク内壁面部滞留量およびタンク内壁面付着量

タンク容積③壁面部滞留量④壁面付着量			タンク容積③壁面部滞留量④壁面付着量			タンク容積③壁面部滞留量④壁面付着量		
V m^3	$Q1+Q2$ m^3	QH m^3	V m^3	$Q1+Q2$ m^3	QH m^3	V m^3	$Q1+Q2$ m^3	QH m^3
10	0.0121	0.0092	200	0.0804	0.0686	1200	0.2492	0.2282
20	0.0188	0.0146	210	0.0829	0.0709	1300	0.2622	0.2408
30	0.0243	0.0192	220	0.0854	0.0731	1400	0.2747	0.2531
40	0.0291	0.0233	230	0.0878	0.0753	1500	0.2869	0.2651
50	0.0335	0.0271	240	0.0902	0.0775	1600	0.2989	0.2768
60	0.0376	0.0306	250	0.0925	0.0797	1700	0.3106	0.2883
70	0.0414	0.0339	260	0.0949	0.0818	1800	0.3220	0.2996
80	0.0451	0.0371	270	0.0971	0.0839	1900	0.3332	0.3107
90	0.0485	0.0401	280	0.0994	0.0860	2000	0.3441	0.3215
100	0.0519	0.0431	290	0.1016	0.0880	2100	0.3549	0.3323
110	0.0551	0.0459	300	0.1038	0.0900	2200	0.3655	0.3428
120	0.0582	0.0487	400	0.1245	0.1092	2300	0.3759	0.3532
130	0.0612	0.0514	500	0.1434	0.1268	2400	0.3861	0.3634
140	0.0642	0.0540	600	0.1609	0.1433	2500	0.3962	0.3735
150	0.0670	0.0565	700	0.1773	0.1590	2600	0.4061	0.3834
160	0.0698	0.0591	800	0.1929	0.1739	2700	0.4159	0.3933
170	0.0725	0.0615	900	0.2078	0.1882	2800	0.4256	0.4030
180	0.0752	0.0639	1000	0.2221	0.2020	2900	0.4351	0.4126
190	0.0778	0.0663	1100	0.2359	0.2153	3000	0.4446	0.4221

表 9 必要洗浄水量

QE 単位 (m³)

$\frac{Q_{RESO}}{Q_{DH}}$	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070
0.010	0.0691	0.0785	0.0998	0.1247	0.1496	0.1746	0.1995	0.2245	0.2494	0.2743	0.2993	0.3242	0.3492
0.015	0.1025	0.1036	0.1105	0.1270	0.1496	0.1746	0.1995	0.2245	0.2494	0.2743	0.2993	0.3242	0.3492
0.020	0.1343	0.1374	0.1382	0.1435	0.1571	0.1762	0.1995	0.2245	0.2494	0.2743	0.2993	0.3242	0.3492
0.025	0.1648	0.1699	0.1721	0.1727	0.1771	0.1886	0.2052	0.2257	0.2494	0.2743	0.2993	0.3242	0.3492
0.030	0.1943	0.2014	0.2051	0.2068	0.2072	0.2110	0.2209	0.2356	0.2540	0.2754	0.2993	0.3242	0.3492
0.035	0.2229	0.2321	0.2372	0.2400	0.2414	0.2418	0.2450	0.2538	0.2669	0.2836	0.3031	0.3251	0.3492
0.040	0.2509	0.2621	0.2686	0.2725	0.2748	0.2760	0.2763	0.2792	0.2871	0.2989	0.3141	0.3321	0.3525
0.045	0.2782	0.2914	0.2994	0.3044	0.3076	0.3095	0.3105	0.3108	0.3134	0.3205	0.3314	0.3454	0.3620
0.050	0.3049	0.3202	0.3296	0.3357	0.3398	0.3426	0.3442	0.3451	0.3454	0.3477	0.3542	0.3642	0.3772
0.055	0.3312	0.3485	0.3593	0.3666	0.3716	0.3751	0.3774	0.3789	0.3797	0.3799	0.3821	0.3880	0.3973
0.060	0.3570	0.3763	0.3885	0.3969	0.4029	0.4071	0.4101	0.4122	0.4135	0.4142	0.4145	0.4164	0.4220
0.065	0.3823	0.4037	0.4174	0.4269	0.4337	0.4388	0.4424	0.4451	0.4470	0.4481	0.4488	0.4490	0.4508
0.070	0.4073	0.4307	0.4458	0.4565	0.4642	0.4700	0.4744	0.4776	0.4800	0.4817	0.4828	0.4834	0.4835
0.075	0.4320	0.4574	0.4739	0.4857	0.4944	0.5009	0.5059	0.5098	0.5127	0.5148	0.5163	0.5173	0.5179
0.080	0.4563	0.4837	0.5017	0.5146	0.5242	0.5315	0.5372	0.5416	0.5450	0.5476	0.5496	0.5510	0.5519
0.085	0.4803	0.5097	0.5292	0.5431	0.5536	0.5617	0.5681	0.5731	0.5771	0.5802	0.5826	0.5844	0.5857
0.090	0.5039	0.5354	0.5563	0.5714	0.5828	0.5917	0.5987	0.6043	0.6088	0.6124	0.6152	0.6174	0.6191
0.095	0.5274	0.5609	0.5832	0.5994	0.6117	0.6214	0.6291	0.6353	0.6403	0.6443	0.6476	0.6502	0.6522
0.100	0.5505	0.5861	0.6098	0.6271	0.6404	0.6508	0.6591	0.6659	0.6715	0.6760	0.6797	0.6827	0.6851
0.110	0.5961	0.6357	0.6623	0.6819	0.6969	0.7089	0.7186	0.7265	0.7331	0.7386	0.7432	0.7470	0.7501
0.120	0.6407	0.6844	0.7139	0.7357	0.7526	0.7661	0.7771	0.7862	0.7939	0.8003	0.8058	0.8104	0.8143
0.130	0.6846	0.7323	0.7647	0.7887	0.8074	0.8224	0.8348	0.8451	0.8538	0.8612	0.8675	0.8729	0.8775
0.140	0.7276	0.7794	0.8147	0.8409	0.8614	0.8780	0.8917	0.9032	0.9129	0.9213	0.9285	0.9347	0.9400
0.150	0.7700	0.8258	0.8639	0.8924	0.9147	0.9329	0.9479	0.9606	0.9714	0.9807	0.9887	0.9957	1.0018
0.160	0.8116	0.8715	0.9125	0.9432	0.9674	0.9871	1.0034	1.0173	1.0291	1.0394	1.0483	1.0561	1.0630
0.170	0.8527	0.9166	0.9605	0.9934	1.0194	1.0406	1.0583	1.0734	1.0863	1.0975	1.1073	1.1159	1.1235
0.180	0.8931	0.9611	1.0079	1.0431	1.0709	1.0936	1.1127	1.1289	1.1428	1.1550	1.1658	1.1751	1.1834
0.190	0.9330	1.0051	1.0547	1.0921	1.1218	1.1461	1.1664	1.1838	1.1988	1.2119	1.2235	1.2337	1.2428
0.200	0.9724	1.0485	1.1010	1.1407	1.1721	1.1980	1.2197	1.2382	1.2543	1.2684	1.2808	1.2918	1.3016
0.250	1.1622	1.2586	1.3255	1.3763	1.4169	1.4504	1.4788	1.5032	1.5246	1.5434	1.5602	1.5752	1.5887
0.300	1.3420	1.4586	1.5399	1.6019	1.6516	1.6928	1.7279	1.7582	1.7848	1.8084	1.8295	1.8485	1.8657

QE

$\frac{Q_{RESO}}{Q_{DH}}$	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.120	0.140	0.160	0.180	0.200	0.250	0.300
0.010	0.3741	0.3991	0.4240	0.4489	0.4739	0.4988	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.015	0.3741	0.3991	0.4240	0.4489	0.4739	0.4988	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.020	0.3741	0.3991	0.4240	0.4489	0.4739	0.4988	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.025	0.3741	0.3991	0.4240	0.4489	0.4739	0.4988	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.030	0.3741	0.3991	0.4240	0.4489	0.4739	0.4988	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.035	0.3741	0.3991	0.4240	0.4489	0.4739	0.4988	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.040	0.3749	0.3991	0.4240	0.4489	0.4739	0.4988	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.045	0.3810	0.4019	0.4247	0.4489	0.4739	0.4988	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.050	0.3927	0.4104	0.4301	0.4515	0.4745	0.4988	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.055	0.4093	0.4238	0.4405	0.4591	0.4793	0.5011	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.060	0.4306	0.4419	0.4555	0.4712	0.4887	0.5080	0.5986	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.065	0.4560	0.4640	0.4746	0.4875	0.5023	0.5190	0.6005	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.070	0.4852	0.4901	0.4976	0.5076	0.5198	0.5339	0.6062	0.6983	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.075	0.5181	0.5197	0.5242	0.5313	0.5408	0.5523	0.6156	0.7000	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.080	0.5525	0.5526	0.5541	0.5584	0.5651	0.5741	0.6282	0.7049	0.7981	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.085	0.5865	0.5870	0.5872	0.5886	0.5926	0.5990	0.6440	0.7130	0.7995	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.090	0.6203	0.6211	0.6216	0.6217	0.6230	0.6269	0.6628	0.7240	0.8039	0.8979	0.9976	1.2470	1.4964
0.095	0.6538	0.6549	0.6557	0.6561	0.6562	0.6575	0.6843	0.7379	0.8110	0.8991	0.9976	1.2470	1.4964
0.100	0.6870	0.6885	0.6895	0.6902	0.6906	0.6908	0.7085	0.7543	0.8208	0.9030	0.9976	1.2470	1.4964
0.110	0.7527	0.7548	0.7565	0.7578	0.7587	0.7594	0.7641	0.7946	0.8477	0.9181	1.0022	1.2470	1.4964
0.120	0.8175	0.8203	0.8225	0.8244	0.8259	0.8271	0.8289	0.8439	0.8837	0.9424	1.0159	1.2470	1.4964
0.130	0.8815	0.8849	0.8878	0.8902	0.8922	0.8939	0.8976	0.9017	0.9281	0.9750	1.0380	1.2479	1.4964
0.140	0.9447	0.9487	0.9522	0.9552	0.9578	0.9600	0.9655	0.9671	0.9801	1.0152	1.0677	1.2553	1.4964
0.150	1.0072	1.0119	1.0160	1.0195	1.0226	1.0253	1.0327	1.0358	1.0394	1.0627	1.1046	1.2699	1.4964
0.160	1.0690	1.0743	1.0790	1.0832	1.0868	1.0900	1.0992	1.1039	1.1052	1.1168	1.1482	1.2912	1.4995
0.170	1.1302	1.1362	1.1415	1.1462	1.1504	1.1541	1.1651	1.1713	1.1740	1.1771	1.1980	1.3187	1.5087
0.180	1.1908	1.1974	1.2033	1.2086	1.2134	1.2176	1.2304	1.2382	1.2422	1.2434	1.2537	1.3521	1.5239
0.190	1.2509	1.2581	1.2646	1.2705	1.2758	1.2805	1.2952	1.3045	1.3098	1.3122	1.3150	1.3910	1.5446
0.200	1.3104	1.3183	1.3254	1.3318	1.3377	1.3429	1.3594	1.3702	1.3769	1.3805	1.3816	1.4353	1.5706
0.250	1.6009	1.6121	1.6222	1.6315	1.6400	1.6479	1.6734	1.6920	1.7054	1.7148	1.7212	1.7269	1.7711
0.300	1.8814	1.8958	1.9090	1.9211	1.9324	1.9427	1.9774	2.0037	2.0237	2.0391	2.0507	2.0676	2.0723

CE=0.00100

図22 Q_E / Q_{RESO} VS Q_{DH} / Q_{RESO}

ある。

しかしながら、今後洗浄汚水の発生量を少なくするために、ノズル径を細くする等により、少水量で効率的な洗浄機が開発されてくるものと思われる。したがって、今後の課題として均一に混合すると仮定して求めた今回の洗浄水量より、効果的な少水量型の洗浄機について必要洗浄水量を求めていく必要がある。

7. 謝 辞

この研究の大部分は日本造船研究協会および日本海難防止協会からの61年受託試験として行われた。また、これに関係する日本造船研究協会のRR25の委員の方々および日本海難防止協会の「有害物質規制方法調査委員会」の委員の方々からは貴重なご意見をいただいた。謝意を表します。

文 献

- 1) 運輸省運輸政策局環境課監修，海洋汚染防止条約，1986，海文堂
- 2) 運輸省大臣官房環境課監修，海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律及び関係法令，1983，成山堂
- 3) 有害液体物質の排出方法および設備に関する調査研究報告書，昭和61年3月，332，日本造船研究協会
- 4) 海洋汚染防止の調査研究事業報告書，昭和61年3月，98，日本海難防止協会
- 5) MARPOL 73/78 条約附属書Ⅱ及びP & A 基準に関する解説と条文解釈，昭和61年9月，204，日本造船研究協会
- 6) R. Byron Bird, Warren E. Stewart, and Edwin N. Lightfoot, TRANSPORT PHENOMENA, A WILEY INTERNATIONAL EDITION, 40