側面攪拌槽内の粒子堆積と石油備蓄タンクの実際

——挿入角 $\theta=20^\circ$ の場合——

紺野大介・沖田直澄

(株)荏原製作所*

側面攪拌槽内の流体の挙動を観察することは頗る難しく、そのフロー・パターンや粒子堆積状態は未だ確証されないまま今日に至っているのが現状である。

前報では攪拌機の軸挿入角 $\theta=10^\circ$ に関してモデルを製作し、その粒子堆積状態とフロー・パターンについて観察、掃引速度に及ぼす操作条件の影響等について検討・考察し、特定角度における掃引面積式を導くと共に過去の若干の資料について疑問点を指摘した。

本報では、この挿入角を $\theta=20^\circ$ まで拡張し、側面攪拌槽内の流れの変化、すなわちこの時の粒子堆積とフロー・パターンを観察し、検討を加えた。 $\theta=20^\circ$ では液深の効果が極めて大きいこと、実機の石油備蓄タンクなどではスラッジ沈降防止策として液深の影響が重要であることなどから、これらをモデルと二、三の実機例と比較し、考察を加えた。

緒言

石油備蓄タンクにおける原油スラッジ堆積層の生因は普通、次のごとく説明されている。すなわち「原油中の土砂や油性の半液状沈降性物質（一般に石油中に溶解した酸素とアスファルテンおよびアスファルト性物質が、液相自動酸化反応を起こして生ずる）が、タンクの澱み部、換言すれば dead space に沈澱するため」とある。

これらの石油備蓄タンクをはじめ大型タンク等の内液沈降防止や混合操作に対し、側面攪拌機が優先的に使用されるのは、頂部挿入式や底部挿入式の攪拌機およびジェット攪拌等の方法に比し、その攪拌効果、メンテナンス、所要エネルギー比などの点で卓越するためである。しかもこの効果の成否は、石油備蓄タンク自体にとって重要であるが、プロセス上においても、油送管と精留塔などの長期運転に際しての問題点、すなわち精留操作に重大な影響を及ぼすとされている精留塔供給液の密度変動に大きな作用をなさしているため、極めて重要な役割を果たしている。

これらに関する既応の研究^{2,4,6)}が極めて少ないことはすでに述べた¹⁾が、軸の挿入角度については Wesselingh³⁾が三種類のモデルタンクを用い、密度差 $2\sim 160\text{ kg/m}^3$ の水・塩水に対し、主として $\theta=8^\circ$ を中心に混合時間や液深の効果について検討している。この中で挿入角 $\theta=20^\circ$ までふらせて、 θ が混合時間に大きな影響を与えることを調べ、特に modified フルード数

が小さい時にはこの傾向が著しく、挿入角 θ がプラス*では側面攪拌噴流は上向きとなり、境界面を打つ、調合操作に適したフロー・パターンとなること、 θ がマイナス*ではこの噴流は水平向きとなり、いわゆる旋回流になること等を説明している。Wilson⁷⁾は実際の石油備蓄タンク大小二基について混合時間等の調査を行っているが、いずれも粒子堆積状態とフロー・パターンについては言及されておらず、これらと挿入角度を関連づけたものは今のところ見当たらない。

そこで前報¹⁾では、従来からブレンディング操作に対し良好とされていた挿入角 $\theta=10^\circ$ に関する粒子堆積とフロー・パターンについて種々の角度から検討した。この結果、 $\theta=10^\circ$ ではいわゆる無旋回流となり、攪拌工学上は調合操作に適したフロー・パターンとなることが認められると共に、粒子堆積の位置を明らかにすることができた。

本報では、この挿入角 θ を 20° まで拡張し、粒子の堆積状態とそのフロー・パターンを観察、次に実際の石油備蓄タンクの計測値と比較し、モデルによる実験的根拠の妥当性について検討した。

1. 実験装置および方法

前報¹⁾ $\theta=10^\circ$ の場合と同一である。但し粒子掃引全時間は、 $\theta=20^\circ$ ではフロー・パターンや掃引面積が液深比の値によって変化したので、最高 210 分までとした。

2. 実験結果と考察

攪拌軸の挿入角度 $\theta=20^\circ$ の場合について、以下の検

* 干144 大田区羽田旭町 11-1

* 攪拌機の取り付け角度とは、槽外に立ち攪拌機を見て、その回転方向が時計方向の場合、攪拌軸をタンク中心より左へ偏らせた場合をプラス、右へ偏らせた場合をマイナスと呼ぶ。

Fig. 1. Flow pattern of propeller No. 3
($\theta=20^\circ$, $n=500 \text{ min}^{-1}$, $M_p=150 \text{ g}$, $H_e/D_t=0.50$)

Fig. 2. Influence of Sweeping Time ($\theta=20^\circ$)
(Propeller No. 3, $M_p=150 \text{ g}$, $H_e/D_t=0.50$)

討を行った。この角度では在来の若干の技術資料³⁾に比し著しく異なる槽底部粒子堆積とフロー・パターンを呈することが明らかとなった。

2・1 掃引面積

攪拌翼の挿入角 $\theta=20^\circ$ 、液深比 $H_e/D_t=0.5$ における粒子群堆積状態の時間変化を Figs. 1, 3, 4 に示す。前報 ($\theta=10^\circ$) との比較により、粒子群の堆積状態は、挿入角 θ によって著しく変化することが解る。すなわち $\theta=20^\circ$ では、粒子は槽内中心部に次第に掃き寄せられ、攪拌翼の回転数や供試翼形状等の条件によって、掃引時間が変化するものの、やがては槽内中央部に円錐状の堆積状態を残し平衡状態に達する。

掃引時間の影響 掃引時間 t は、 $\theta=20^\circ$ の場合についても、 $S_{SW} \sim t^{g(\theta,n)}$ の形で関係する。プロペラ No. 3 で液深比 $H_e/D_t=0.5$ の状態における各回転数の変化の一例を Fig. 2 に示す。この液深比では、掃引時間が

Fig. 3. Flow pattern of propeller No. 1
($\theta=20^\circ$, $n=600 \text{ min}^{-1}$, $M_p=150 \text{ g}$, $H_e/D_t=0.50$)

Fig. 4. Flow Pattern of Propeller No. 1
($\theta=20^\circ$, $n=500 \text{ min}^{-1}$, $M_p=150 \text{ g}$, $H_e/D_t=0.50$)

ある一定の値を越えると平衡状態に達するが、その値は回転数によって変化する。実験変数 g は、 $\theta=10^\circ$ では回転数に無関係に $g=0.20$ であったのに対し、 $\theta=20^\circ$ では回転数の関数になっていることが明らかで、図より $g=n/10^3$ となる。この傾向は攪拌翼のいかんにかかわらず同様であり、例えば Figs. 3, 4 に示すプロペラ No. 1 の場合でも、回転数 $n=600 \text{ rpm}$ では、掃引開

Fig. 5 Relation between $S_{sw\infty}$, M_p and n : $\theta = 20^\circ$

Fig. 6 Influence of particle mass.

Fig. 7 Influence of particle mass.

始後約 30 分で平衡状態に達しているのに対し、500 rpm では約 2 倍の掃引時間を経なければ、槽内平衡状態に達しないことが読みとれる。

挿入角度の影響 液深比 $H_e/D_t = 0.5$ の条件下において、平衡状態における掃引面積を $S_{sw\infty}$ で表し、これと粒子量 M_p 、回転数 n との関係を整理すれば Fig. 5 となる。Fig. 6 に回転数を一定にしたときの $S_{sw\infty}$ と M_p の関係を示す。一方、平衡状態に達する以前の掃引面積すなわち S_{sw} に対する粒子量 M_p と回転数 n との関係を調べると Table 1* となり、この関係を Fig. 7 に示す。これより粒子量は $S_{sw} \sim M_p^{-0.68}$ で関与することが明白である。Fig. 8 は回転数 n の影響を示したも

Fig. 8 Influence of revolution

のである。以上より、 $S_{sw0}^{**} \leq S_{sw\infty} (= 250 M_p^{-0.12} n^{0.30})$ の条件下で全データを整理すると Fig. 9 となり、挿入角度 $\theta = 20^\circ$ の場合の面積式 Eq. (1) を得る。

$$S_{sw0} = 3.0 \times 10^{-2} (p^{1/3} w^{1/7})^4 M_p^{-0.68} n^{2.0} t^{0.20} \quad (1)$$

$$S_{sw0} = 8.5 \times 10^{-3} (p^{1/3} w^{1/7})^4 M_p^{-2.0} n^{2.0} t^{0.20} \quad (2)$$

前報より $\theta = 10^\circ$ の掃引面積式は Eq. (2) で示されるので、この両式より、 $S_{sw0} \sim n^{2.0}$ 、すなわち掃引面積は攪拌軸の回転数 n の 2 乗に比例するという事象は、挿入角 θ に無関係に成立することが明らかとなった。

2.2 粒子の堆積状態とフロー・パターン

挿入角度の影響 掃引関係測定実験により、側面攪拌槽内における攪拌軸の挿入角度は、 $\theta = 10^\circ$ と $\theta = 20^\circ$ との間で、槽内フロー・パターンと粒子の堆積状態の双方に非常に大きな影響を与えることが明らかとなった。 $\theta = 10^\circ$ の挿入角では、フロー・パターンが無旋回流であったのに対し、 $\theta = 20^\circ$ の場合、Figs. 1, 3, 4 が示すように、槽内本体流のフロー・パターンは、いずれも旋回流が優勢であり、そのため槽底面の境界層内には、境界層外の遠心力に釣合うために、槽中心部に向かう圧力勾配が生ずる。槽底の粒子群は中心部に集合し、最終的には円錐状堆積を形成する。

液深比の影響 Figs. 10~13 にプロベラ、No. 3, $n = 500$ rpm, $M_p = 150$ g の状態における液深比 H_e/D_t

* 表中の S_{sw} : 1' とは、運転開始して、1 分経過後の掃引面積を示す。

** $S_{sw0} = S_{sw} \times (\text{槽底面積}/\text{槽底面の撮影値}) = 1.06 S_{sw}$

Fig. 9 Sweeping area formula in case of $\theta=20^\circ$

$=0.2, 0.4, 0.8, 1.0$ の 4 種類の比較の一例を示す。 $\theta=10^\circ$ の場合、フロー・パターンは液深に対し、あまり影響されなかったが、これらの 4 つの変化図より、 $\theta=20^\circ$ の場合は極めて影響されることが明らかとなった。

液深比 $He/D_t=0.2$ すなわち槽径に対し槽内液高さが比較的低い場合には、Figs. 1, 3, 4 などと同様にフロー・パターンは旋回流が主流を占める。この傾向は液深比の増大にともなって減少し、 $He/D_t=0.8$ のように、槽径に対し槽内液高さがかなり高くなると、槽底粒子群は中央部に集合する気配を見せるが、結局は $He/D_t=0.2$ に示されるような充分な円錐状堆積は形成せず、液深比 $He/D_t=1.0$ になると、もはや全く異なった様相を呈す。この関係を掃引速度 $\dot{S}_{sw}(=dS_{sw}/dt)$ で整理した結果の一例を Table 2 に示す。すなわち S_{sw} は前報より基本的に挿入角 θ と時間 t で表現できるので $S_{sw}=at^b$ となり a, b は共に $f(\theta)$ であるところから、 a および

Table 1 Relation between $S_{sw} \cdot 1'$, M_p and $n: \theta=20^\circ$

M_p [g]	PRO. NO. 3		
	n [rpm]	$S_{sw} \cdot 1'$	$S_{sw} \cdot 1'$
	400: ○	500: □	600: △
		[cm ²]	
50	140	210	310
100	95	130	200
150	67	100	156
200	60	80	130
250	45	76	115
300	45	64	100

b は、例えば Fig. 2 などから直読できる。したがって S_{sw} を微分することで掃引速度と各液深比との関係を表せる。Table 2 より、液深比 He/D_t が 0.4 より大きい場合には、実験変数 ab はほぼ 47 と一定であるところから、掃引速度 $\dot{S}_{sw}$ は液深比の増大に伴って減少することが認められる。一方 $\theta=20^\circ$ の場合、フロー・パ

Fig. 10 Flow pattern of $H_e/D_t=0.2$

Fig. 11 Flow pattern of $H_e/D_t=0.4$

Fig. 12 Flow pattern of $H_e/D_t=0.8$

ターンは液深の増加にともなって旋回流は主流でなくなり、 $H_e/D_t=1.0$ では、あたかも $\theta=10^\circ$ の場合の粒子堆積状態とはほぼ一致し、旋回流がほとんど消滅していることを示している。以上より液深比が小さい場合に旋回流フロー・パターンを呈する翼挿入角においても液深比が増大すると、掃引速度の減少を誘発し無旋回流フロー・パターンに近づくことが明らかとなった。

Fig. 13 Flow pattern of $H_e/D_t=1.0$

Table 2 Influence of liquid depth $\dot{S}_{sw} = (dS_{sw}/dt) = abt^{b-1}$ No. 3 propeller, $n=500 \text{ min}^{-1}$ $M_p=150 \text{ g}$, $\theta=20^\circ$

RUN	64	65	12	66	67	68
H_e/D_t	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
a	100	90	100	125	140	180
b	0.60	0.50	0.50	0.38	0.32	0.26
$a \cdot b$	60	45	50	48	45	47
$b-1$	-0.40	-0.50	-0.50	-0.62	-0.68	-0.74

3. 実験における確認と考察

実際の石油備蓄タンクにおいて、側面攪拌機の挿入軸を $\theta=20^\circ$ で固定した場合の、スラッジ堆積状態例を Figs. 14, 15 に示す。これらのタンクは、それぞれ直径 $D_t=25, 20 \text{ m}$ 、液深比 $H_e/D_t=0.59, 0.85$ であり、攪拌機の軸心はタンク底板より、それぞれ 1.25, 1.5 m に取り付けられている。攪拌翼径はいずれも 630 mm で、ピッチ 1.0、船用プロペラ構造の 3 枚翼羽根車であり、425 rpm で運転された。Fig. 14 の原油はアラビアン・ミディウム（商品名）であり、その堆積状態は原油チャージ後 2 日（1 日 $\times$ 8 時間運転）後と 1 週間（同 56 時間）後の二度において周囲温 $12 \sim 18^\circ \text{C}$ で計測された。この堆積図は、まず第一にいずれもタンク内に旋回流が主流として存在していることが推察され、流れの幾可学的相似を論ずるまでもなく実機における原油スラッジ堆積状態が、モデルのそれに比率的にかなり合致していることが認められる。第二に、実機の場合、攪拌機に比しタンク径があまりに大きいため特定のフロー・パターンを得るのに相当の時間がかかることが一般的に知られているが、本図 2 日後の実測値はこのためか旋回流の存在が認められつつ、同時に攪拌吐出噴流方向の右側槽底縁部に、低いスラッジの堆積も認めることができる。しかし 1 週間経過後には、この堆積層はほとんど消滅し、あたかもモデル Fig. 1 の 210 分経過後の平衡状態に近似していることが解る。これは原油（アラビアン・ミデ

ィアム)の性状(比重=0.871, API 度=30.9, 動粘度 $=1.13 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 流動点 $=-15^\circ\text{C}$ 以下でワックス分 $=0\%$, 水分分 $=0.15\%$)が攪拌機にとって沈降防止に對し比較的輕負荷のためモデル結果に近似的に對應したものと考えられる。

Fig. 15 の原油はカフジ(商品名)であり, その堆積状態は原油チャージ後5日(1日平均8時間運転)後のもので周囲温 $=16^\circ \sim 21^\circ\text{C}$ で計測された。本図は $\theta=20^\circ$ にもかかわらず, 前報 $\theta=10^\circ$ の実機におけるスラッジ堆積状態に比し, あまり大きな変化が示されていない。これは当初, 原油の性状(比重 $=0.885$, API 度 $=28.4$, 動粘度 $=1.17 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 流動点 $=-35^\circ\text{C}$ でワックス分 $=2.9\%$, 水分分 $=0.05\%$)によるものと考えられてきた。しかし第一に掃引時間が充分なこと, 第二に液深比がかなり大きいこと, 第三にプロペラ吐出噴流方向左側の対向槽底縁部にはスラッジの堆積形跡が残されていない等々の理由により, 主因としてこのタンクの大きさには十分な掃引速度が得られず, したがって Fig. 12 や Fig. 13 のように $\theta=20^\circ$ であるにもかかわらず優勢な旋回流を発生させられなかった結果による作用と考えることができる。

結 言

1) 粒子沈積状態については, $\theta=20^\circ$ の場合, 槽内に旋回流が存在する条件(主として液深比0.5以下)を整えば, 槽内底面中央部に円錐状堆積を生ずる。

2) 攪拌軸の挿入角 $\theta=20^\circ$ の場合, 槽内には優性な旋回流のフロー・パターンが生ずるが, 液深の増加に伴い旋回流は弱体化し, $He/D_t=1.0$ では, ほぼ無旋回流となる。

3) 掃引面積に関しては $He/D_t=0.50$ に適用できる式 Eq. (1)を導き, 掃引面積は挿入角 θ に無関係に回転数の2乗に比例することを, また掃引時間の影響は, $\theta=20^\circ$ では回転数の関数 $t^{n/103}$ になることを, それぞれ明らかにした。

【謝 辞】 本研究の実機原油備蓄タンクのスラッジ堆積計測は SHELL CO. GODOROF REFINERY (西独)の厚意によるものです。また確証・参考データを送附頂いた出光興産(株), 東亜重石(株), 東京電力(株)の各社に對し謝意を表します。

Nomenclature

A	= experimental variable	[—]
a	= experimental variable	[—]
b	= experimental variable	[—]
D_i	= diameter of impeller	[cm]
D_t	= diameter of tank	[cm]

Fig. 14 Sludge sedimentation of actual crude oil storage tank
 $D_t=25 \text{ m}$, $D_i=630 \text{ mm}$, $H_e/D_t=0.59$, $n=425 \text{ min}^{-1}$, Crude Oil=Arabian Medium Oil

Fig. 15 Sludge sedimentation of actual crude oil storage tank
 $D_t=20 \text{ m}$, $D_i=630 \text{ mm}$, $H_e/D_t=0.85$, $n=425 \text{ min}^{-1}$, Crude Oil=Kafji Oil

f	= experimental variable	[—]
g	= experimental variable	[—]
H_l	= height of liquid	[cm]
H_t	= height of tank	[cm]
M_p	= particle mass	[g]
n	= revolution per minute	$[\text{min}^{-1}]$
p	= pitch ratio	[—]
Re	= Reynold's Number	[—]
S_{sw}	= Sweeping area at tank bottom surface	$[\text{cm}^2]$
S_{sw}	= Sweeping velocity	$[\text{cm}/\text{min}]$
v	= representative velocity of discharge flow	$[\text{cm}/\text{sec}]$
ω	= average vane width ratio	[—]
θ	= insert angle at visual face from tank top	$[\circ]$
μ	= kinematic viscosity	$[\text{m}^2/\text{s}]$
ρ_p	= density of particle	$[\text{g}/\text{cm}^3]$
t	= Sweeping time	[min]
<Subscript>		
Run. NO. means number of photograph running under the fixed conditions.		

Literature cited

- 1) Konno, D. and N. OKITA: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 9, 309 (1983)
- 2) Oldshue, J. Y., Hirshland, E. H., and Gretton, A. D.: *Chem. Eng. Progr.*, 52, 481 (1956)
- 3) Royal dutch shell: "Side entering mixers for new storage tanks". Design and Engineering practice DEP. 31, 51,

- 10, 31 (1971)
- 4) Vusse, V.: *Chemie-Ing. Techn.*, 31, Jahrg. 583 (1959)
- 5) Wesselingh, J. A.: *Chem. Eng. Sci.*, 30, 973 (1975)
- 6) Wilson, N. G.: "Economic and operating procedure of crude oil tank mixer. "Petro. Mech. Eng. conte of ASME (1954)
- 7) Wilson, N. G.: *Oil and Gas J.L.*, Nov. 8, 165. (1954)

(1983 年 6 月 3 日受理)

Particle Sedimentation in Model Tank and Crude Oil Storage Tank with Side-entering Mixer

——Case of inserting angle $\theta=20^\circ$ ——

Daisuke Konno and Naozumi Okita

EBARA Co., Tokyo 144

Key Words: Particle Sedimentation, Side Entering Mixer, Flow Pattern, Insert Angle, Crude Oil Tank

The behaviour of the liquid in a side-entry mixing tank is very difficult to observe, and to date the flow pattern and particle sedimentation process in such tanks have not been conclusively clarified.

In the previous report the flow pattern and particle sedimentation process in a specially manufactured model mixer with a shaft entry angle $\theta=10^\circ$ were observed and studied, with consideration also given to the effects of the handling conditions on the sweeping velocity of the mixer. Introducing sweeping-area formulas corresponding to the specified entry angle, the report also raised doubts concerning the sparse data presently available on these mixers.

In the present study the entry angle was increased to $\theta=20^\circ$ and the flow variations in the mixing tank, i.e., the flow pattern and particle sedimentation process, were investigated. The results indicated that at $\theta=20^\circ$ the effects of the depth of liquid in the mixer were very significant and that the liquid depth performed an important role as a sludge sedimentation preventive measure in the oil storage tank or in other parts of the full-scale mixer. A comparative analysis of the model as well as two and then three full-scale mixers was performed, and conclusions were drawn from the results of the study.