

津波による屋外タンクの滑動・漂流実験および予測手法の提案

Model Experiment and Simulative Prediction on Slipping and Drifting of Oil Storage Tank by Tsunami

稲垣 聡¹・池谷 毅²・大森政則³・藤井直樹⁴・向原 健⁵・畑山 健⁶

Satoshi INAGAKI, Tsuyoshi IKEYA, Masanori OMORI,
Naoki FUJII, Takeshi MUKOHARA and Ken HATAYAMA

When the oil storage tanks drift from their initial place by tsunami, they may cause severe troubles such as destruction of structures nearby and leaks of stored oil. Model experiments revealed that the tsunami wave force and friction forces determine the slipping and drifting of the tanks, therefore we constructed a simulation model using the momentum equation for the prediction of the tank movement. The simulation results well represented the track of drifting measured by the model experiment. When the oil tanks start to drift, they tend to drift for several hundred meters unless they remain in the initial place by the force of static friction.

1. はじめに

沿岸部に設置された石油などの屋外タンクにおいて、津波による被災が過去に発生している。特に2004年のスマトラ沖地震津波では、インドネシア・アチェ州ロンガのセメント工場において、水・軽油などのタンクが移動し、防液堤を破壊、周辺建物に衝突するなどした(後藤, 2005)。また、同州クルランヤ石油配送ターミナルにおいては、3基のタンクが300m以上移動するなどの被害が報告されている。

屋外タンクが滑動・漂流すると、タンクが周辺の構造物に衝突し、タンクが壊れ内容液が流出するおそれがあるほか、衝突した先の構造物を破壊するおそれがある。本研究では、タンクの津波による滑動とその後の漂流の挙動のメカニズムを解明するために水理模型実験を実施し、その結果に基づいてタンク漂流挙動の予測手法を提案する。

2. タンク滑動と漂流の水理模型実験

(1) 実験条件

実験に共通する条件を下記に記す。

a) 実験施設

図-1(a)のように軸流ポンプ式の長周期波(津波)造波装置をもつ大型平面水槽にて実施した。

b) 地形条件

図-1(a)のように水槽内にハの字型に仕切板(縮流板)

を設置し、沖で造波した波を増幅させることで、1/50スケールの大縮尺で実験することとした。模型スケールで護岸前水深0.21m(現地スケールで10.5m)、陸上部標高は0.03m(同1.5m)とし、護岸前海底は水平で、護岸から4m(200m)の箇所から勾配をつけて深くしている。陸上部の長さは12m(600m)確保して水平とし、後端は自由流出として陸側の反射波がない状況での実験とした。

c) 津波条件

津波条件については、津波高さは陸上部の津波浸水深を用いて現地スケールで2mと3mを想定し、周期は5分と10分を考え、その組み合わせとした。

表-1 津波条件

波番号	実験スケール		現地スケール	
	浸水深	周期	浸水深	周期
Wave1	4cm	42.4s	2m	5分
Wave2	6cm	42.4s	3m	5分
Wave3	4cm	84.8s	2m	10分
Wave4	6cm	84.8s	3m	10分

d) 構造物条件

タンク模型は表-2の2種類を作製した。透明アクリル製で、中に重りや水を入れて内液量を自由に設定できる。

また、実験ケースによって、Tank1の周囲に高さ40mm(現地2m)の防液堤を設置している。設置の場合の平面図を図-1(b)に示す。

タンクの設置位置はタンク中心が護岸から0.6m(現地スケール30m)となる位置にした。なお、現地屋外タン

表-2 タンク模型

タンク	模型	実物	備考(模擬対象)
Tank1	D=213mm	D=10.64m	995kl 軽油 タンク
	H=243mm	H=12.16m	
Tank2	D=581mm	D=29.06m	9,922kl FRT
	H=365mm	H=18.26m	

1 正 会 員 工修 鹿島建設技術研究所 主任研究員
2 フェロー 工博 鹿島建設技術研究所 グループ長
3 正 会 員 東電設計(株)土木本部 主任
4 正 会 員 東電設計(株)土木本部 課長
5 正 会 員 工修 鹿島建設技術研究所 研究員
6 (理)総務省消防庁 課長補佐

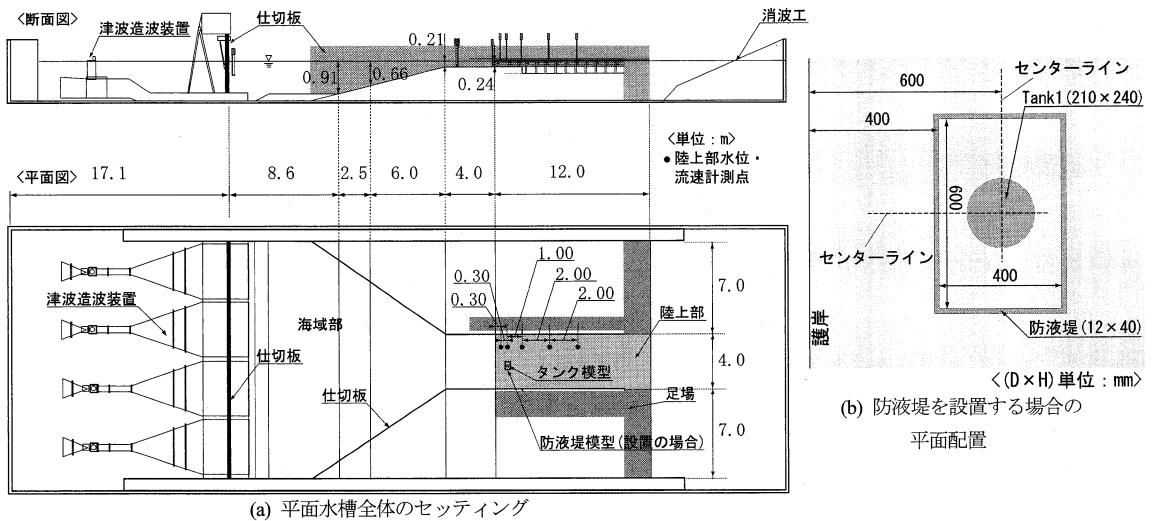


図-1 水理模型実験のセッティング

クの底版と基礎との間の静止摩擦係数は0.4～0.7とされるため(JIS B 8501(p.130)), アクリル製のタンク模型との摩擦係数がそれに近い発泡ポリエチレンシートをタンク設置位置に敷いて実験した。なお、別途計測の結果、実験時の静止摩擦係数は0.4であった。

(2) タンクの漂流挙動

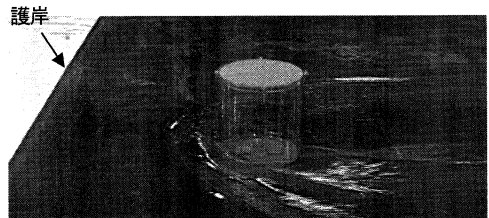
実験により観察された、防液堤が無いときのタンク漂流挙動の基本パターンを以下に記す。例として、Tank1の模型にWave1の津波を当てた時の様子を写真-1に示す。

- 津波が当たり始めた当初は、タンクは静止摩擦力で基礎上に留まっている(写真-1(a))。後述のようにタンク底部下面への水の入り込みは少しずつ起きている。
- 静止摩擦力が津波の水平力に抗し切れなくなると、タンクは動き出す。この瞬間、タンク底部下面に多量の水が入り込み、タンクは浮力を受けて大きく動き出す(写真-1(b))。
- 水深がタンクの喫水より十分大きいときは、タンクは浮かびながら漂流する(写真-1(c))。
- タンク周辺の水位が下がったとき、タンクは減速を始め、最終的に停止する。

(3) 周囲流速との関係

内液量11.8%のTank2にWave2の波が作用したとき、タンクの移動(護岸からの時々刻々の距離)をステレオビデオトラッカーにて計測した例を図-2(a)に示す。同じケースでタンクが移動した位置における水位を図-2(b)に、タンクが移動した位置における周囲流速および図-2(a)のタンク位置の微分から求めたタンク移動速度を図-2(c)に示す。水位・流速はタンクを置かないときの値であり、図-1(a)に示した計測点の値から補間して求めた。

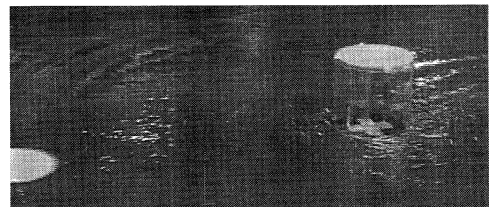
タンクは津波フロントの通過後、水位と流速が上昇してはじめて動き出し、2～3秒後から周囲流速と同速度に



(a) 初期位置で津波を受けるタンク



(b) 移動を始めたタンク



(c) 浮上して漂流するタンク

写真-1 Tank1(内液量10%), Wave1のときのタンクの挙動

なって動いた後、水位が下がると減速止まる様子がわかる。水位低下時の減速は摩擦力によると考えられる。

動き出す直前におけるタンク底部と基礎の間に入り込む水の様子を、タンクの上部から撮影したものを写真-2に示す。内液量10%のTank2にWave2を当てた場合のものである。水は津波の上流側から一部入り込み、タンク底面に部分的に浮力を作用させると考えられる。

図-3はタンクの移動を複数回、同じ津波条件(Wave1

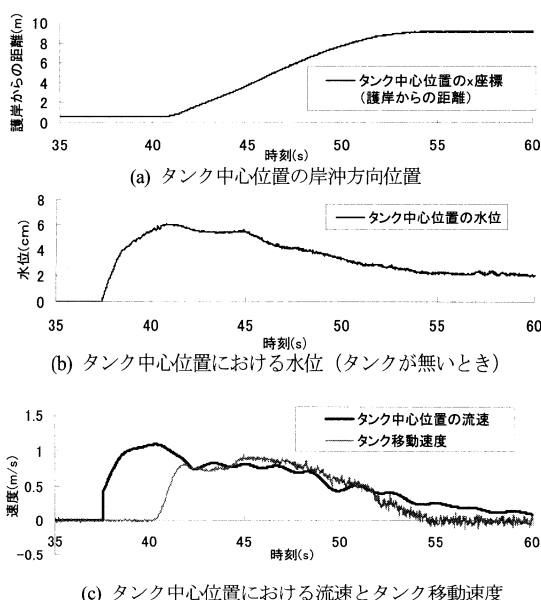


図-2 タンクの移動と周囲水の水位・流速
(Tank2, Wave2, 防液堤なし)

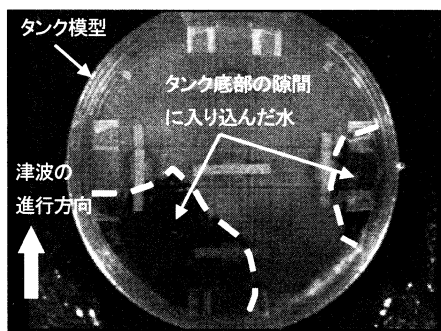


写真-2 初期位置でタンク底部とタンク基礎の隙間に入り込む水の様子

およびWave2)で測定した結果である。移動のタイミング・距離は若干ばらつくが、内液量が小さい方が動き出しが早く、より長距離移動する傾向であることがわかる。また、実験で見られた2~10mの移動距離は、現地スケールに換算すると100~500mの距離に相当し、一度動き始めたタンクは津波によりタンク径などのスケールに比較してかなりの長距離を移動することがわかる。

(4) 防液堤がある場合のタンクの挙動

Tank1の周囲に図-1(b)のように防液堤を設置して津波を当てた場合に、タンクの挙動を観察した例を表-3および写真-3に示す。実験ケースによりタンクは防液堤を越える場合、越えない場合がみられた。

タンクおよび防液堤周辺の水位分布を計測した結果を図-4に示す。防液堤が無い場合の水位に比べて、防液堤がある場合に水位は大きく高まることわかる。この水

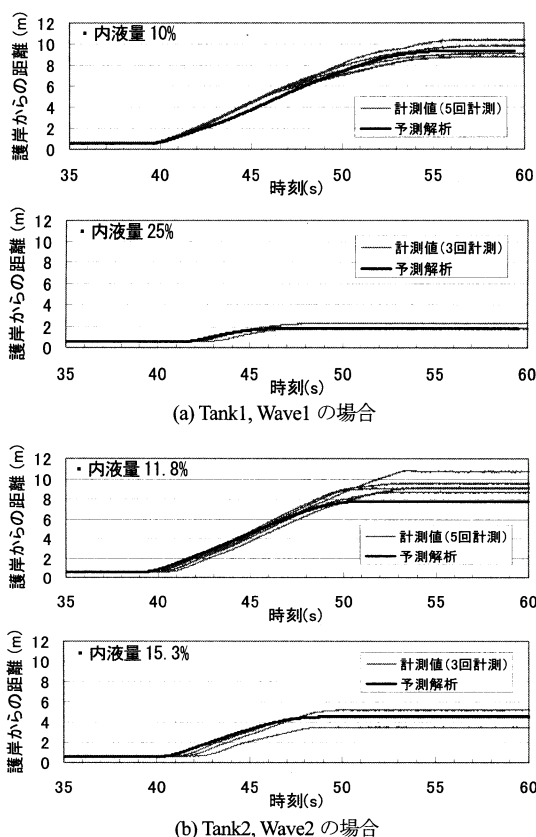


図-3 タンク中心位置(護岸からの距離)の時刻変化実験計測値および解析予測値(3.に後述)

表-3 防液堤がある場合のタンク挙動

波条件	内液量	タンク挙動
Wave1	10%	防液堤上で停止 (写真-3 (a))
	20%	防液堤を越えない
Wave2	10%	防液堤を越えて漂流 (写真-3 (b))
	20%	防液堤を越えて漂流

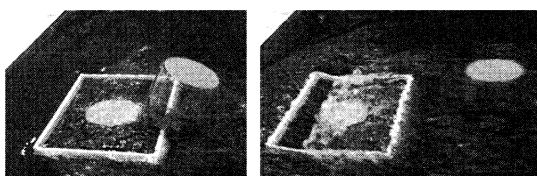


写真-1 防液堤がある場合のタンク挙動例

位分布を受けて、タンクは浮上時の喫水(内液量10%のとき2.6cm, 20%のとき4.85cm)が、防液堤の越流水深より大きいときはタンクは防液堤内に留まり、喫水が越流水深より小さいときはタンクは防液堤を越えて漂流した。同程度のときはその中間で防液堤上で停止するなどの挙動をした。このように、タンクが防液堤を乗り越えるか否かはタンクの浮上時の喫水と防液堤の越流水深の

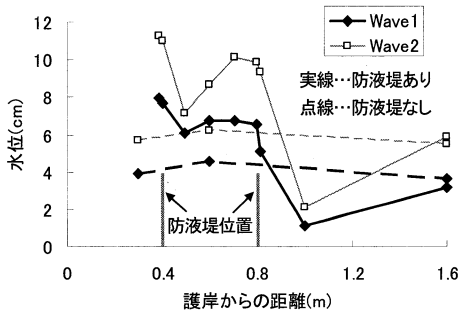


図-4 遡上水深最大時刻での防液堤付近水位分布
(タンク設置なし)

大小で判断できることがわかった。

3. 漂流挙動評価モデルの開発

(1) 運動方程式の構築

津波の水位と流速の時間・空間分布が得られている場合に、上記のタンク移動のメカニズムを表現する運動方程式によるタンク挙動の予測手法を構築した。運動方程式は(1)式(池谷ら, 2006; 藤井ら, 2007; 今村ら, 2001)を用いた。

$$(M+m_a)\ddot{x}_G + N\dot{x}_G = F_T - F_D \quad (1)$$

ここで M :タンク質量, m_a :付加質量, N :付加減衰, F_T :津波流体力, F_D :滑動抵抗であり、この方程式の解 x_G がタンクの位置となる。

流体力は以下のモリソン式とする。

$$F_T = \rho/2 \cdot C_D \cdot (u - \dot{x}_G) \cdot |u - \dot{x}_G| \cdot S \eta + C_M \cdot \rho \cdot A \cdot \eta \cdot \dot{u} \quad (2)$$

ここに ρ :流体密度, C_D :抗力係数, C_M :慣性力係数, u :タンクの位置の流速(タンクが無いとき), $\dot{u}$:タンクの位置の流れ加速度, S :タンク軸直角方向の幅(=直径 D), A :タンクの底面積, η :タンク位置の水深(タンクが無いとき)である。

摩擦抵抗は、止まっているときの静止摩擦抵抗 F_{Ds} と動き出した後の動摩擦抵抗 F_{Dd} を考える。

$$F_D = F_{Ds} + F_{Dd} \quad (3)$$

まず静止摩擦力は、図-5および式(4)のようなバネを考える。

$$F_{Ds} = \begin{cases} 0 & (x_G - x_0 \leq 0) \\ (F_1/x_1) \cdot (x_G - x_0) & (0 < x_G - x_0 \leq x_1) \\ 0 & (x_G - x_0 > x_1) \end{cases} \quad (4)$$

$$F_1 = \mu_s (Mg - U_s) \quad (5)$$

$$U_s = a_s \rho g A \eta \quad (6)$$

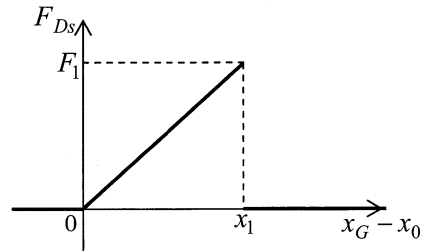


図-5 静止摩擦力のバネ設定

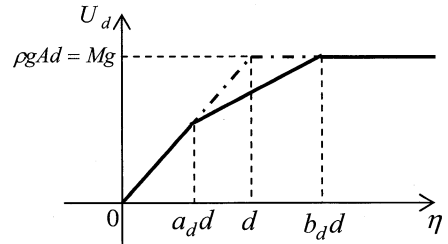


図-6 動摩擦力計算時の浮力の設定

x_0 :タンク初期位置, x_1 :タンク基礎水平バネの最大変位, F_1 :最大静止摩擦力, μ_s :静止摩擦係数, U_s :静止摩擦時の作用浮力, a_s :作用浮力に関する定数。

タンク初期位置からの水平変位が、地盤バネの最大変位(変形できる最大の長さ)に達するときに最大静止摩擦力が発生し、それを越えてタンクが変位すると静止摩擦力は0になるとする。ここで、地盤バネの最大変位は、別途計測をしたところ0.2mmであった。

なお、式(5)の最大静止摩擦力の計算で、作用浮力を考慮している。これは、2.(3)で述べたタンク底部と基礎の隙間に入り込む水の効果を考慮したものである。この入り込む水による作用浮力を、周辺水位の静水圧積分値の2割($a_s=0.2$)と見積り、式(6)の定式化を行った。

タンクが動き出した後の動摩擦力は、動摩擦係数×重さの下記の式で表す。

$$F_{Dd} = \mu_d (Mg - U_d) \frac{\dot{x}_G}{|\dot{x}_G|} \quad (7)$$

$$U_d = \begin{cases} \rho g A \eta & (\eta < a_d) \\ \rho g A \{a_d d + (1-a)/(b-a) \cdot (\eta - a_d)\} & (a_d d \leq \eta < b_d d) \\ \rho g A d = Mg & (\eta \geq b_d d) \end{cases} \quad (8)$$

μ_d :動摩擦係数, U_d :動摩擦力作用時の作用浮力, a_d , b_d :定数, d :タンク浮上時の喫水。

動摩擦作用時にタンクが受ける作用浮力は、タンク底部に十分に水が入り込むとすると、周囲水位がタンクの喫水に達するまでは周囲水位による静水圧の積分値となる。この場合、作用浮力は図-6の一点鎖線のようなになる($a_d=b_d=1.0$)。しかし、実際のタンクは、喫水以下の水深でもタンクの端が持ち上がって傾き動摩擦力が減ることがあり、また逆に水深が喫水を上回る状態でも、タン

クが傾くことによって地面に接触し動摩擦力を受ける場合が実験で観察された。これらの影響を考慮するため、図-6の実線および式(8)のように、定数 a_d , b_d を用いて、作用浮力を途中で切り替えるように設定した。

(2) 水理模型実験結果との比較

表-4にパラメータを示す。摩擦係数は計測値を用い、抗力係数・慣性力係数は円柱の標準的な値を用いた。付加質量・付加減衰の値は、理論的検討が困難であったため、実験結果に合うように設定した。実験で計測した津波の水位・流速の時空間分布の情報を用い、実験結果のタンクの動きを予測した結果を図-3に追記する。実験のばらつきの範囲内に予測結果がほぼ収まり、実験結果を良く表しており、本予測手法は妥当と考えられる。

表-4 実験予測に用いたパラメータ

項目	記号	設定値
津波水位・流速場	η, u	実験で計測した値
タンク重量	M	ケースにより変化
タンク直径	D	0.213m(Tank1), 0.581m(Tank2)
静止摩擦係数	μ_s	0.4
動摩擦係数	μ_d	0.2
抗力係数	C_D	1.2
慣性力係数	C_M	2.0
タンク付加質量	m_a	0.1M
タンク付加減衰	N	0
静止摩擦時の作用浮力定数	a_s	0.2
動摩擦時の作用浮力定数	a_d, b_d	0.8, 1.2

4. 津波作用時の屋外タンク移動距離に関する考察

2.(3)で述べたように、津波で移動を始めたタンクは長距離(現地スケールで数百mのオーダー)を移動している。また、示した例より内液量が多いケースでは、タンクは静止したまま動かなかった。

図-7のタンク設置位置の津波水位・流速の変化の特徴と合わせて考察する。津波による水平力は、水位・流速が最大の頃に最大となるが(①)、ここまで動かなかったタンクは、その後は作用する力が落ちるので動く可能性は小さくなる。逆に言えば動くタンクはそれまでの②のタイミングで動き出すことになり、その後長時間津波の作用を受けることになる(③)。動き出した後は大きな浮力を受け、浮かばない場合も周囲の水浸しの場所は摩擦が小さい状況になり長距離滑動することになる。

わが国のタンク設置場所の状況を考えると、タンクから数百m以内に他の構造物が無いことは考えにくく、津波を受けたタンクは、その場に留まるか何かに衝突する

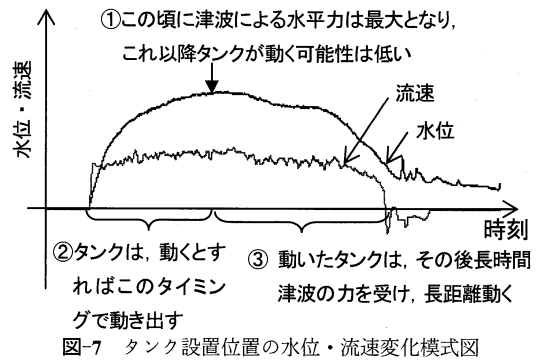


図-7 タンク設置位置の水位・流速変化模式図

まで動くかのどちらかになる可能性が高いと考えられる。

5. おわりに

本研究では屋外タンクの津波による滑動とその後の漂流の挙動について水理模型実験を実施し、それを基にしたタンク挙動の予測手法提案を行った。

- 津波によりタンクが移動・漂流する場合、タンクは静止摩擦力が津波の作用力に抗し切れ無くなると動き出し、浮力を受けて漂流し、動摩擦力を受けて減速し停止する、というメカニズムが明らかになった。
- タンク周囲に防液堤を設置した場合には、タンクは防液堤で止まるケースや乗り越えるケースがあり、タンク浮上時の喫水と津波の防液堤の越流水深の大小で両者が分かれることがわかった。
- 上記のタンク滑動・漂流のメカニズムを表現しうる運動方程式に対して、津波の水位変化・流速変化の情報を入力として与えることにより、タンクの漂流挙動を予測する手法を構築した。

謝辞：本研究に際し、亀井浅道消防研究センターフェロー、今村文彦東北大学教授、清宮理早稲田大学教授に多くのご指導を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 池谷毅・稲垣聡・朝倉良介・福山貴子・藤井直樹・大森政則・武田智吉・柳沢賢(2006)：津波による漂流物の衝突力の実験と評価手法の提案，海岸工学論文集，第53巻，pp.276-280。
- 今村文彦・吉田功・アンドリュー・ムーア(2001)：沖縄県石垣島における1771年明和大津波と津波石移動の数値解析，海岸工学論文集，第48巻，pp.346-350。
- 後藤洋三(2005)：スマトラ地震の津波災害による屋外タンク貯蔵所等の被害事例調査報告，Safety and Tomorrow, No.114, pp.60-73。
- 藤井直樹・福山貴子・稲垣聡・池谷毅・柳沢賢・大森政則(2007)：津波による漂流物挙動の変動性に関する実験と評価方法の提案，海岸工学論文集，第54巻，pp.241-245。