

第4章

長周期地震動による被害(危険物タンクのスロッシング) を対象とした評価

第4章 長周期地震動による被害（危険物タンクのスロッシング）を対象とした評価

4.1 長周期地震動による災害拡大シナリオの想定

4.1.1 地震時のスロッシングによる被害事例

危険物タンク（屋外タンク貯蔵所）では、長周期地震動の影響によりスロッシング（液面揺動）が発生し、被害が生じる危険性がある。スロッシングとは、地震波と容器内の液体が共振して液面が大きく揺れる現象である。これにより、特に浮き屋根式のタンクでは、浮き屋根の損傷や火災の発生、内容物の溢流といった被害が懸念される。

スロッシングによる被害は、1923年の関東地震以降の国内外の事例が確認されているⁱ。ここでは主な被害事例として、1964年新潟地震、2003年十勝沖地震、2011年東日本大震災でのスロッシング被害をとりあげる。

(1) 1964年新潟地震

昭和石油新潟製油所では、地震後間もなく浮き屋根式の原油タンク（容量3万3千kl、出火当時2万7千kl）から出火し、同タンクヤード内の別の4基の原油タンクにも延焼して、16日間にわたって燃え続けたⁱⁱ。出火原因は、スロッシングにより浮き屋根が大きく揺動し、屋根とタンク側板との間で生じた衝撃火花、または摩擦熱によって可燃性蒸気に着火したものと推定されている。当時は、屋根とタンク側板との間に設けられたシール機構が金属製であったために衝撃火花が発生した可能性があり、現在の技術基準に適合したタンクでは着火危険性は低くなっている。

また、新潟火力発電所では、固定屋根式の重油タンク（容量2万kl）2基においてスロッシングが発生し、固定屋根と側板との接合部が破損して合計約2千klの重油が防油堤内に流出した。ⁱ

(2) 2003年十勝沖地震

苫小牧のコンビナートにおいて、地震とほぼ同時に浮き屋根式の原油タンクでリング火災が発生した他、地震から2日後に、地震により浮き屋根が破損・沈降していたナフサタンクで全面火災が発生した。これらはいずれもシングルデッキタイプの浮き屋根式タンクである。その他にも、スロッシングにより浮き屋根の沈没、内容物の溢流、浮き屋根や内部浮き蓋の損傷、ポンツーン内への油の流入、ゲージポール損傷等の被害が多数発生している。被害は浮き屋根式タンク（シングルデッキ）が中心であるが、内部浮き蓋式、固定屋根式タンクにおいても発生している。

苫小牧におけるスロッシング被害の分析結果からは、スロッシング最大波高が概ね2m以上のシングルデッキ浮き屋根式タンクにおいて甚大な被害が発生していること、また、10万kl級の巨大タンクの浮き屋根に対しては、1次モードの影響が大きい最大波高だけでなく、2次モードのスロッシング（図4.1.1参照）が浮き屋根に与える影響も考慮する必要があることが指摘されている。ⁱⁱⁱ

ⁱ 太田外氣晴、座間信作：巨大地震と大規模構造物－長周期地震動による被害と対策－、共立出版、2005。

ⁱⁱ 消防庁：石油コンビナート等防災体制検討会（H26.1.30）配布資料

ⁱⁱⁱ 座間信作：2003年十勝沖地震にみる石油タンク被害の特徴と対策，物理探査，Vol59，No.4，2006

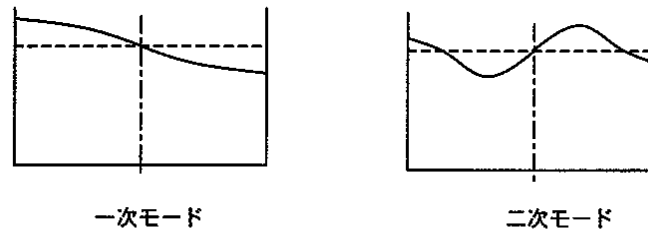


図 4.1.1 スロッシングモード

(3) 2011 年東日本大震災

東日本大震災では、長周期地震動による被害は日本海側や東京湾岸で顕著であり、東北太平洋側では大きな被害は生じていない。

山形県の酒田地区では、最も大きな長周期地震動が観測され、内部浮き蓋式タンク 1 基のアルミニウム製浮き蓋（簡易フロート型）が全破損する被害が生じている。

新潟県の新潟西港、新潟東港地区では、長周期地震動による浮き屋根の沈没や傾斜はなかったが、ポンツーン内の滞油、アルミニウム製浮き蓋の破損などの被害が生じている。

神奈川県在京浜臨海地区では、シングルデッキ型の浮き屋根式タンク 1 基において、地震の数日後に浮き屋根が沈没する被害が生じた他、浮き屋根・内部浮き蓋のポンツーン内への滞油、内部浮き蓋の破損、側板頂部と固定屋根の変形などの被害が生じている。

なお、消防庁の調査ⁱによると、浮き屋根の被害は、耐震基準への適合の対象であるが未適合のタンクと、耐震基準への適合の対象外であるタンクに発生している。

千葉県では、浮き屋根式タンク 2 基において漏洩が発生したほか（浮き屋根上への滞油及びルーフトレンから防油堤内への流出）、浮き屋根式タンク 6 基及び内部浮き蓋式タンク 1 基において浮き屋根やガイドポールの破損が発生している（すべて京葉臨海中部地区）。京葉臨海中部地区の地震記録からは、京葉臨海中部地区では周期 3～5 秒程度及び 9～10 秒程度の周期において、地震動が大きくなっていたことが推測されている（資料 11）。

4.1.2 災害拡大シナリオ

以上の被害事例を踏まえ、スロッシングによる災害の様相は、屋根形式毎に次のように整理することができる。これらの災害拡大シナリオを ET 図 6-1～6-7 に示す。

(1) 浮き屋根式タンク

ET 6-1 浮き屋根からの溢流

想定を超える波高のスロッシングにより、タンク上部から内容物が溢流する。着火した場合にはタンク周辺（防油堤内）の火災となる。

ⁱ 消防庁危険物保安室・特殊災害室：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討報告書，2011

ET6-2 浮き屋根上への流出

浮き屋根の揺動により内容物が屋根上へ流出して着火する。固定式泡消火設備による初期消火に成功した場合にはリム火災、失敗した場合にはリング火災となる。火災が継続し、浮き屋根が破損・沈降した場合にはタンク全面火災となり、さらに火災が長時間継続すると、油種によってはボイルオーバーが発生し、火災が拡大してタンク全面・防油堤火災に至る。

注) ボイルオーバーに関しては、「第6章 大規模災害を対象とした評価」において検討する(以下同様)。

ET6-3 浮き屋根の損傷・沈降

スロッシングにより浮き屋根が破損・沈降する。着火した場合にはタンク全面火災となる。火災が長時間継続すると、油種によってはボイルオーバーが発生し、火災が拡大してタンク全面・防油堤火災に至る。

ET6-4 タンク中のドレン配管の破損

浮き屋根の揺動によりドレン配管を破損し、防油堤内へ流出する。着火した場合にはタンク周辺(防油堤内)の火災となる。ドレンバルブの閉止に失敗した場合には流出火災が拡大する。

(2) 内部浮き蓋式タンク

ET6-5 浮き蓋上への流出

内部浮き蓋の揺動により内容物が浮き蓋上へ流出し、タンク上部の空間に可燃性蒸気が滞留する。可燃性蒸気に着火・爆発すると、タンク火災となる。初期消火に成功した場合にはタンク小火災、失敗した場合にはタンク全面火災となる。火災が長時間継続すると、油種によってはボイルオーバーが発生し、火災が拡大してタンク全面・防油堤火災に至る。

ET6-6 浮き蓋の損傷・沈降

スロッシングにより内部浮き蓋が破損・沈降し、タンク上部の空間に可燃性蒸気が滞留する。可燃性蒸気に着火・爆発すると、タンク火災となる。初期消火に成功した場合にはタンク小火災、失敗した場合にはタンク全面火災となる。火災が長時間継続すると、油種によってはボイルオーバーが発生し、火災が拡大してタンク全面・防油堤火災に至る。

ET6-7 タンク上部の破損

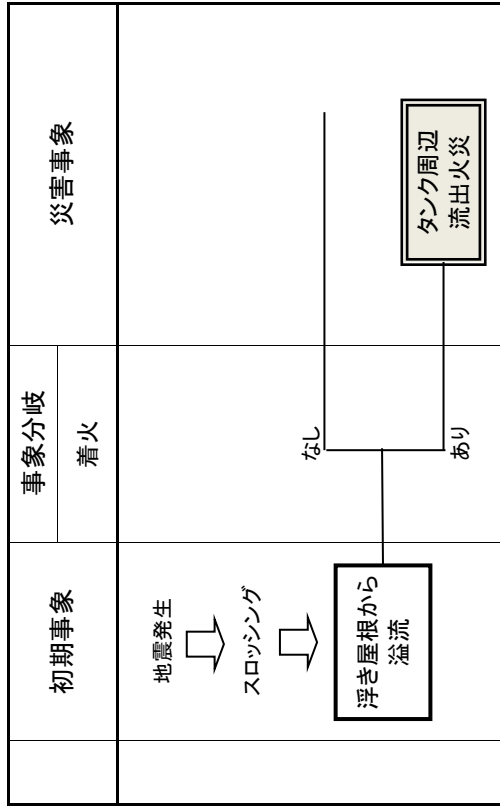
想定を超える波高のスロッシングにより、側板と屋根との接続部を損傷し、内容物が流出する。着火した場合にはタンク周辺(防油堤内)の火災となる。また、タンク内で着火した場合にはタンク火災となる(タンク内に可燃性混合気形成されているような場合には爆発を生じ、直ちにタンク全面火災に至る可能性がある)。初期消火に成功した場合にはタンク小火災、失敗した場合にはタンク全面火災となる。火災が長時間継続すると、油種によってはボイルオーバーが発生し、火災が拡大してタンク全面・防油堤火災に至る。

(3) 固定屋根式タンク

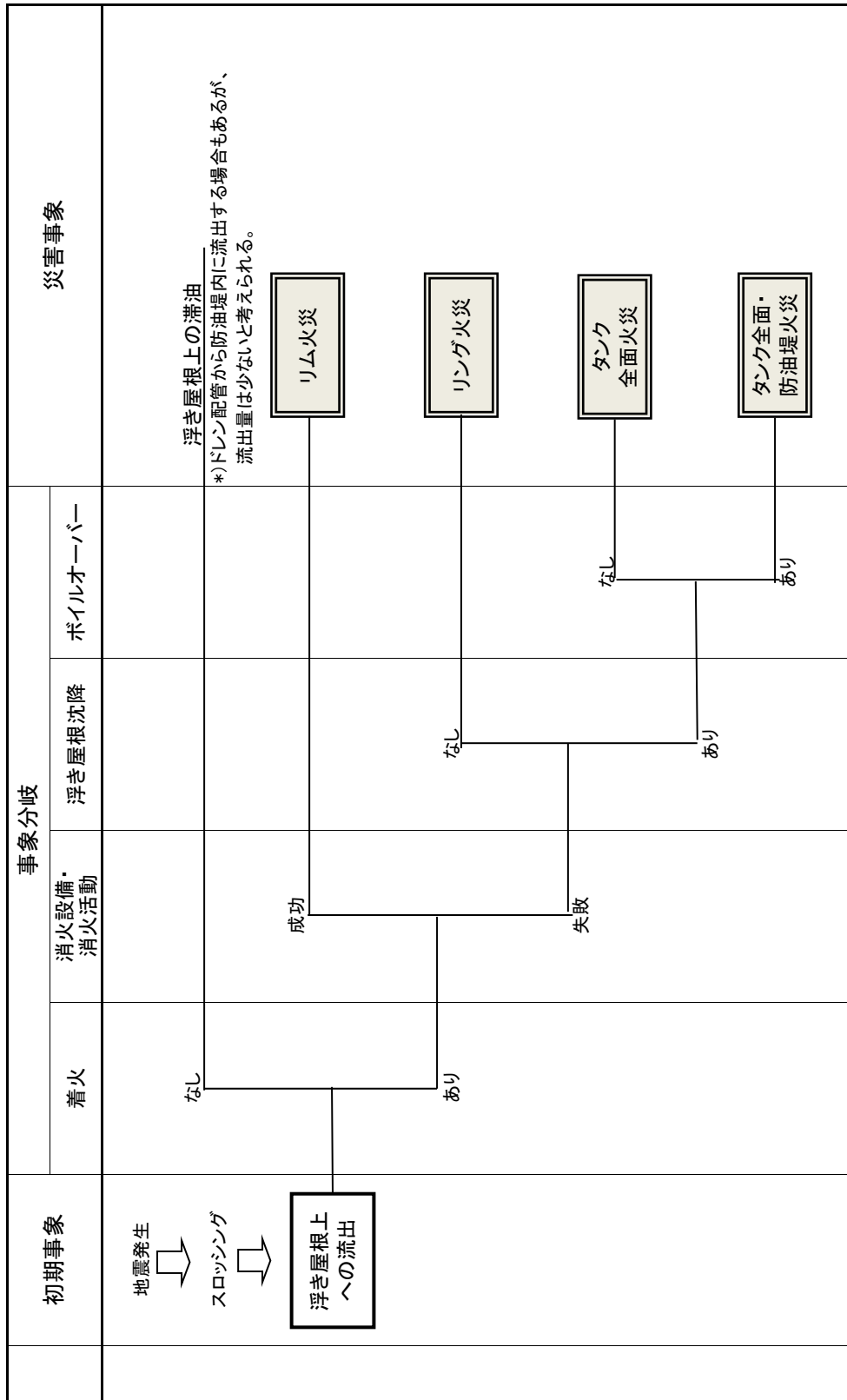
ET6-7 タンク上部の破損

内部浮き蓋式タンクと同様に、タンク上部の破損から流出火災またはタンク火災に至る。

ET図6-1 浮き屋根からの溢流(浮き屋根式タンク)



ET図6-2 浮き屋根上への流出(浮き屋根式タンク)



ET図6-3 浮き屋根の損傷・沈降(浮き屋根式タンク)

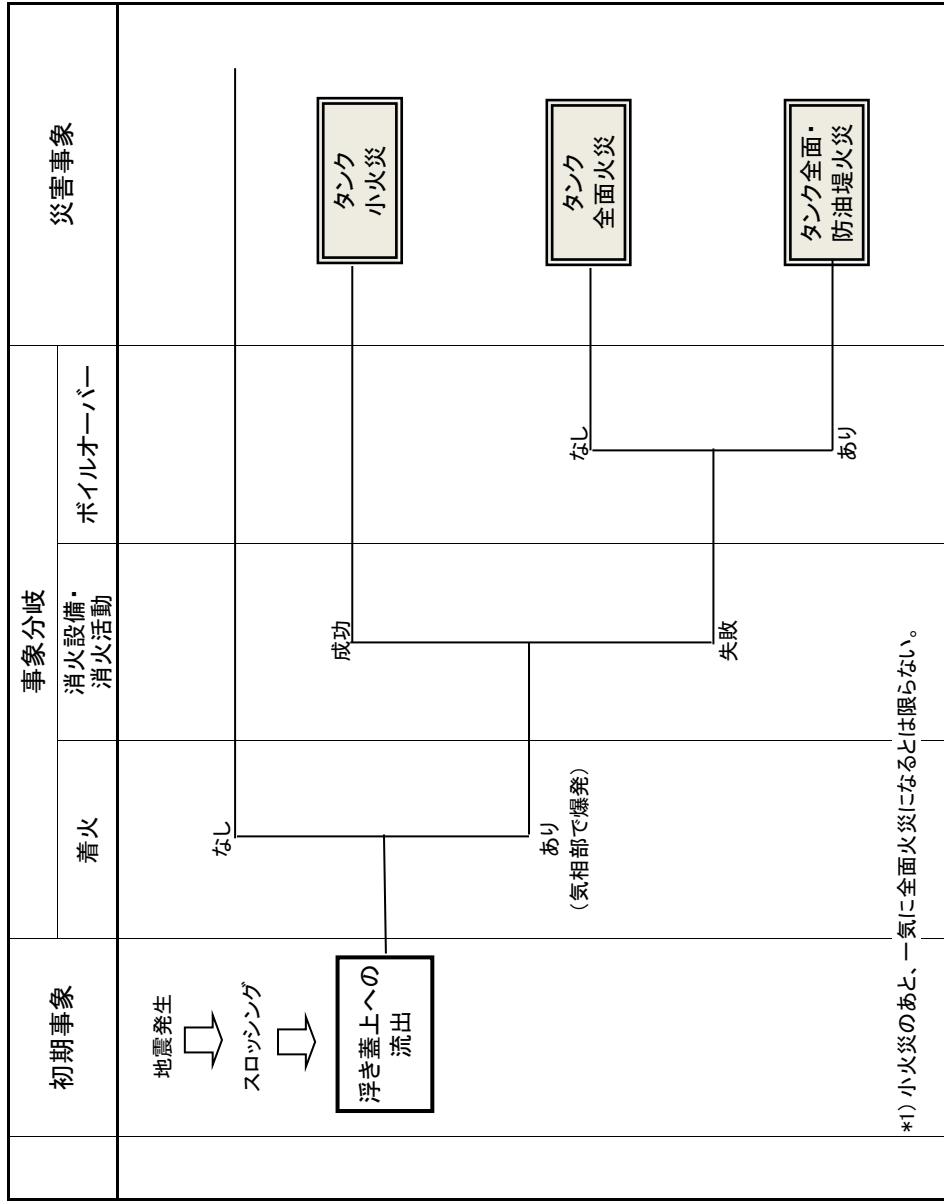
初期事象	事象分岐		災害事象
	着火	ボイルオーバー	
地震発生 ↓ スロッシング ↓ 浮き屋根の 損傷・沈降	なし		タンク 全面火災
	あり	あり	タンク全面・ 防油堤火災

ET図6-4 タンク中のドレン配管の破損（浮き屋根式タンク）

初期事象	事象分岐				災害事象
	ドレンバルブ閉止	仕切堤	防油堤	着火	
地震発生 ↓ スロッシング ↓ ドレン配管の破損	成功 ↓ 失敗	成功 ↓ 失敗	成功 ↓ 失敗	なし	流出（タンク周辺）
				あり	タンク周辺流出火災
				なし	仕切堤内流出
				あり	仕切堤内流出火災
				なし	防油堤内流出
				あり	防油堤内流出火災
				なし	防油堤外流出
				あり	防油堤外流出火災

*) 浮き屋根上に流出した油がドレン配管を通って流出することもある(ET図5-2参照)。

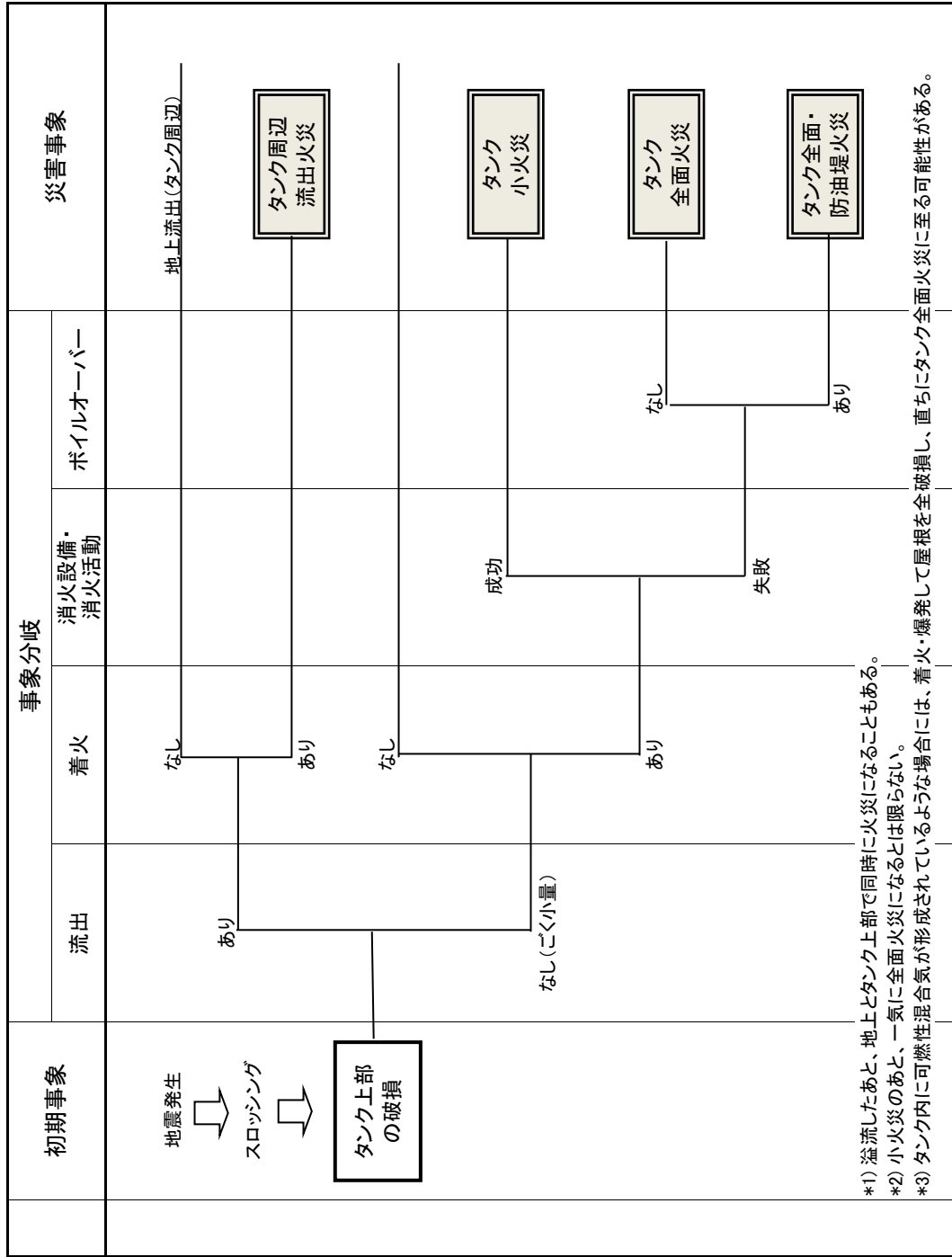
ET図6-5 浮き蓋上への流出(内部浮き蓋式タンク)



ET図6-6 浮き蓋の損傷・沈降(内部浮き蓋式タンク)

初期事象	事象分岐			災害事象
	着火	消火設備・消火活動	ボイルオーバー	
地震発生 ↓ スロッシング ↓ 浮き蓋の 損傷・沈降	なし			タンク 小火災
	あり (気相部で爆発)	成功	なし	タンク 全面火災
		失敗	あり	タンク全面・ 防油堤火災
*1) 小火災のあと、一気に全面火災になるとは限らない。				

ET図6-7 タンク上部の破損(内部浮き蓋式・固定屋根式タンク)



4.2 スロッシングによる被害の評価方法

4.2.1 消防法におけるスロッシング対策

(1) スロッシングを考慮した液面管理

消防法告示ⁱでは、容量 1,000kl 以上の特定屋外タンク貯蔵所について、スロッシングが発生しても内容物の溢流が生じないように、スロッシングによる最大波高を想定した液面管理（タンク上部に余裕空間を確保する）が定められている。この余裕空間の高さは次式で求められる。

$$H_c = 0.45 D K h_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$K h_2 = 0.15 \nu_1 \nu_4 \nu_5$$

$$\nu_4 = 4.5 / T_s$$

$$T_s = 2\pi \sqrt{D / 3.68 g \cdot \coth(3.68 H / D)}$$

ここで、

H_c ：側板の最上端までの空間高さ(m)

$K h_2$ ：液面揺動の設計水平震度

ν_1 ：地域別補正係数 (=1.0：千葉県内の全地区)

ν_4 ：液面揺動の一次固有周期を考慮した応答倍率

ν_5 ：長周期地震動に係る地域特性に応じた補正係数 (図 4.2.1)

T_s ：タンクのスロッシング基本（1次）固有周期(s)

D ：タンク内径(m)

H ：最高液面高さ(m)

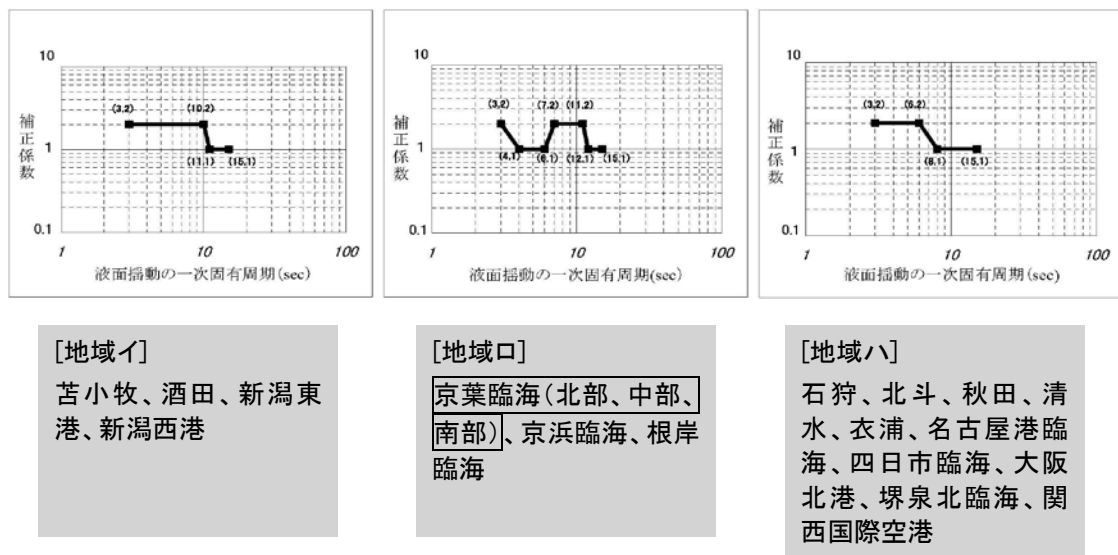


図 4.2.1 長周期地震動に係る地域特性に応じた補正係数

注) 消防法告示では、長周期地震動に係る地域特性に応じた補正係数 (ν_5) は、タンク周辺の敷地における地震動記録等に基づき、地域特性を考慮して予想された速度応答スペクトルから補正係数を

ⁱ 危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示，昭和 49 年自治省告示第 99 号

求めることを基本とし、適切な地震動記録が得られていない場合については、図 4.2.1 の補正係数を用いることができるとしている。図の補正係数は、コンビナート最寄りの気象官署等における観測記録に基づき最低限の値として示されているものであり、タンク周辺の強震計地震動記録等に基づき予測される速度応答スペクトルが得られる場合には、別途検討を行う必要がある。

表 4.2.1 は、千葉県内のコンビナートにおける危険物タンク（容量 500kl 以上の屋外タンク貯蔵所）について、屋根型式別に基数を整理したものである（スロッシングによる被害の評価にあたっては、固有周期が 3 秒未満のタンク及び平底円筒形以外の形式のタンクは対象外とする）。

京葉臨海北部地区と南部地区には浮き屋根式のタンクはなく、容量 1 万 kl を超えるような大規模なタンクは少ない。京葉臨海中部地区には固定屋根式、内部浮き蓋式、浮き屋根式（シングルデッキ・ダブルデッキ）のタンクがあり、固定屋根式とシングルデッキ浮き屋根式のタンクが多い。固定屋根式のタンクは比較的小規模なものが多いが、容量 1 万 kl を超えるような大規模なタンクもある。

表 4.2.1 京葉臨海北部・中部・南部地区の危険物タンク

地区	固定屋根	内部浮き蓋	浮き屋根		その他 (対象外)	計
			シングルデッキ	ダブルデッキ		
京葉臨海北部	88(1)	9	0	0	(0)	97(1)
京葉臨海中部	636(5)	146	249	28	(10)	1059(15)
京葉臨海南部	6	2	0	0	(0)	8
計	730(6)	157	249	28	(10)	1164(16)

*) 括弧内は評価対象外としたタンク数(外数)で、固有周期が 3 秒未満のタンク(消防法による液面管理の対象としているタンクとの整合性を図るため)及び平底円筒形以外の形式のタンク(後述するスロッシング最大波高の推定式の適用対象外)である。

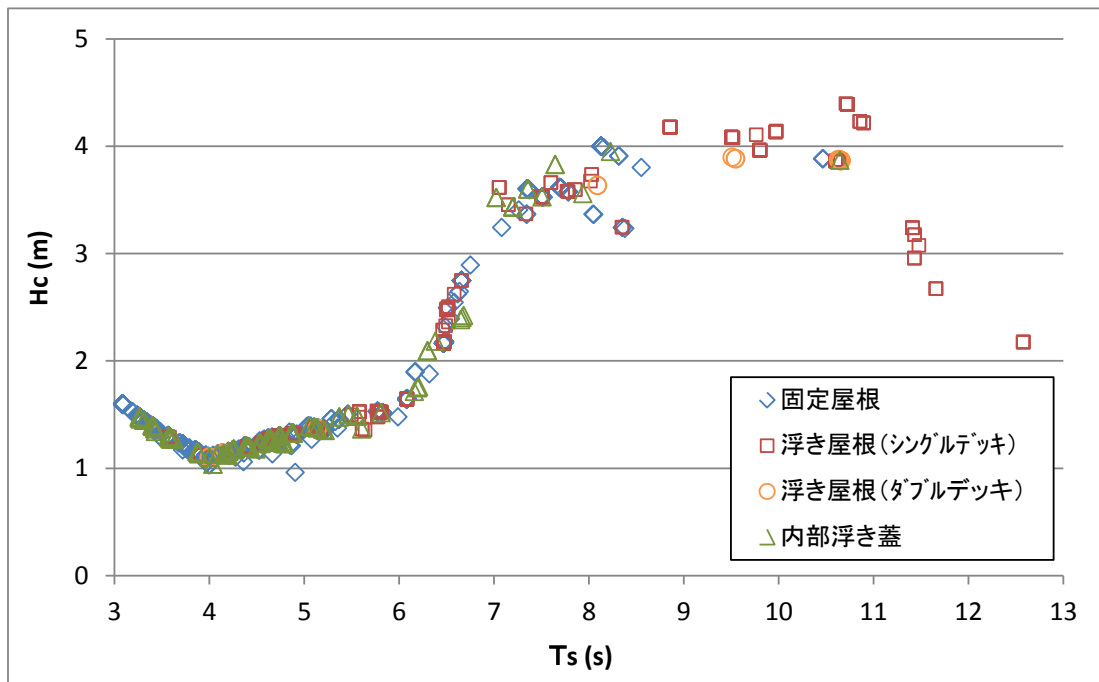


図 4.2.2 スロッシング固有周期(Ts)と余裕空間高さ(Hc)

図 4.2.2 に、スロッシングによる被害の評価対象とした 1164 基のタンクについて、スロッシング固有周期(T_s)に対する余裕空間高さ(H_c)の分布を示す。多くのタンクでは H_c が 1~2m の範囲にあるが、容量 1 万 kl を超える大規模タンクでは H_c が 2~5m 程度になる（満液時においてこの程度の余裕がある）。

(2) 浮き屋根の技術基準への適合(浮き屋根式タンク)

シングルデッキタイプの浮き屋根を有する特定屋外タンク貯蔵所のうち、容量 2 万 kl 以上のタンクと、容量 2 万 kl 未満で $H_c \geq 2m$ のタンクについては浮き屋根の技術基準が定められており、2017 年（平成 29 年）3 月 31 日までの適合が求められている。なお、ダブルデッキタイプの浮き屋根については現在のところ同様の技術基準は示されていないが、相隣接する二の室（ポンツーン）が破損した場合において沈下しないものであることなどが定められている。

(3) 内部浮き蓋の技術基準への適合(内部浮き蓋式タンク)

内部浮き蓋式の特定屋外貯蔵タンクについては、2011 年 12 月に内部浮き蓋の技術基準が策定され、浮き蓋の浮力、耐震強度といった浮き蓋の構造に関する事項や、浮き蓋上部空間の可燃性蒸気を屋外に有効に排出するための設備を設けること、危険物受入時の受入配管からの噴き上げによる浮き蓋損傷の防止措置などについて定められた。

なお、具体的な内容は浮き蓋の構造（一枚板及び二枚板構造、簡易フロート型等）に応じて定められている。また、既設の内部浮き蓋式特定屋外貯蔵タンクについては、タンク内に不活性ガスを充填して取り扱うことなど、一定の条件を満たす場合には適用しないこととされた。これ以外の既設タンクについては、2024 年（平成 36 年）3 月 31 日までの経過措置が設けられている。

4.2.2 スロッシングによる被害の評価方法

スロッシングによる被害の発生形態は危険物タンクの屋根形式により異なるが、スロッシングによる被害の発生は揺れの大きさ（スロッシング最大波高）にある程度依存すると考えられるⁱ。したがって、想定地震が発生した場合のスロッシング最大波高を推定し、消防法に基づく余裕空間高さ（側板の最上端までの空間高さ）との比較を行う。スロッシング最大波高が余裕空間高さを上回る場合には、特に浮き屋根式のタンクにおいて溢流が発生する危険性があることから、溢流した場合の溢流量を推定する。

(1) スロッシング最大波高の推定

スロッシング最大波高の推定には、次式で表される速度応答スペクトル法がよく用いられ、観測値との整合性がよいことが確認されている（資料 7 参照）。

$$\eta = 0.837 \left(\frac{D}{2g} \right) \left(\frac{2\pi}{T_s} \right) S_v(T_s) \dots\dots\dots (2)$$

ⁱ 座間信作：2003 年十勝沖地震にみる石油タンク被害の特徴と対策，物理探査，第 59 巻第 4 号(2006)，353-362

$$T_s = 2\pi \sqrt{\left(\frac{D}{3.682g}\right) \coth\left(\frac{3.682H'}{D}\right)}$$

ここで、

- η : スロッシング最大波高(m)
- D : タンク内径(m)
- H' : 液面高さ(m)
- g : 重力加速度(9.8m/s²)
- T_s : タンクのスロッシング基本 (1次) 固有周期(s)
- Sv(T_s) : 周期 T_s における疑似速度応答スペクトル(m/s)

ただし、式(1)は微小波高を仮定したもの（線形解）であり、溢流が生じるような大きなスロッシングの場合には、非線形性の影響による波高増分を考慮する必要がある。非線形性を考慮したスロッシング最大波高は、西・他（2008）により次式が提案されている（資料 8）ⁱ。

$$\eta^+ = \eta + \Delta \eta \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta \eta = 0.91R(\eta/R)^2$$

ここで、

- η^+ : 非線形性を考慮したスロッシング最大波高 (m)
- η : スロッシング最大波高 (式(1)による線形解: m)
- $\Delta \eta$: 非線形液面増分 (m)
- R : タンク半径 (m)

(2) 溢流量の推定

非線形性を考慮したスロッシング最大波高(η^+)とタンクの側板高さとの差を溢流高さ(δh)とすると、溢流量は次式で求められる（資料 8）ⁱ。

$$\Delta v = (R^2 \pi) \cdot (\alpha \cdot \delta h \cdot (R - r_0) \cdot \theta_0 / R) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

- Δv : 溢流量 (m³)
- δh : 溢流高さ (m)
- R : タンク半径 (m)
- r_0 : タンク側板高さにおける $\theta = 0^\circ$ の半径との交点 (m)
- θ_0 : 側板近傍においてスロッシング波高が H_c と等しくなる円周方向角度 (rad)
- α : 0.659(自由液面)、0.4023(浮き屋根)

ⁱ 西晴樹, 山田實, 座間信作, 御子柴正, 箕輪親宏 : 石油タンクのスロッシングによる溢流量の算定, 圧力技術, Vol46, No.5, 2008

西らは、これらの結果について過去の地震による実際の溢流量との比較検証を行い、2003年十勝沖地震でのシングルデッキ型浮き屋根式タンク3基の実溢流量から、十分な適用性があることを確認している。

4.3 前提となる地震の想定（長周期地震動）

危険物タンクのスロッシングを引き起こすような、3～15秒程度の周期の地震動は「やや長周期地震動」と呼ばれ、海溝型の巨大地震により生じやすい。

平成21年度に千葉県が実施した防災アセスメント調査ⁱでは、大きな長周期地震動を生じる可能性のある海溝型地震として地震調査研究推進本部の予測ⁱⁱによる想定東海地震を取り上げ、スロッシング最大波高及び溢流が想定される場合の溢流量の推定を行っている。

その後、内閣府より南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動の予測結果ⁱⁱⁱが公表されたことから、今回新たに南海トラフ沿いの巨大地震を対象とし、スロッシングによる災害の危険性について評価を行う。

4.3.1 長周期地震動の予測結果

内閣府では、過去地震として1707年宝永地震（M8.6）、1854年安政東海地震（M8.4）、1854年安政南海地震（M8.4）、1944年昭和東南海地震（M7.9）、1946年昭和南海地震（M8.0）の5地震を対象とし、さらに最大クラスの地震として、5つの過去地震の強震動生成域を包絡するように震源断層を設定し、これら6地震について長周期地震動の予測を行っている。

図4.3.1に、長周期地震断層モデルの強震動生成域位置を示す。

本調査では、これらの地震のうち、千葉県のコンビナートに影響の大きい最大クラスの地震及び1854年安政東海地震、1707年宝永地震の予測結果（それぞれの地震について、大中小の3ケース）の提供を受けた。

4.3.2 速度応答スペクトルの推定

図4.3.2～4.3.4に、最大クラスの地震及び1854年安政東海地震、1707年宝永地震（各地震共最大ケースについて）の速度応答スペクトルを示す。これらは、危険物タンクを有する事業所毎に代表するメッシュ（所在施設が多いメッシュ）を抽出し、速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.5\%$ 、水平2成分の合成）を示したものである。図には、あわせて消防法で想定しているレベルを太線で示しているが、いずれも消防法の基準を下回ることがわかる。

南海トラフにおける地震の発生確率は今後30年以内に70%程度と評価されており（資料9）、地震の発生危険性は高いと言える。したがって、今後発生する危険性が高い地震として、過去に発生した地震のうちより大きい1854年安政東海地震を想定しておくことが必要と考えられる。ただし、上記の発生確率には南海トラフ全体が動く最大クラスの地震も含まれること、安政東海

ⁱ 千葉県石油コンビナート等防災本部：千葉県石油コンビナート等防災アセスメント調査結果報告書，2010

ⁱⁱ 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」2009年試作版，2009

ⁱⁱⁱ 南海トラフの巨大地震モデル検討会，首都直下地震モデル検討会：南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告，2015

地震と最大クラスの地震との速度応答スペクトルとの差があまりないことを踏まえ、ここでは最大クラスの地震を想定してスロッシング最大波高の推定を行う。

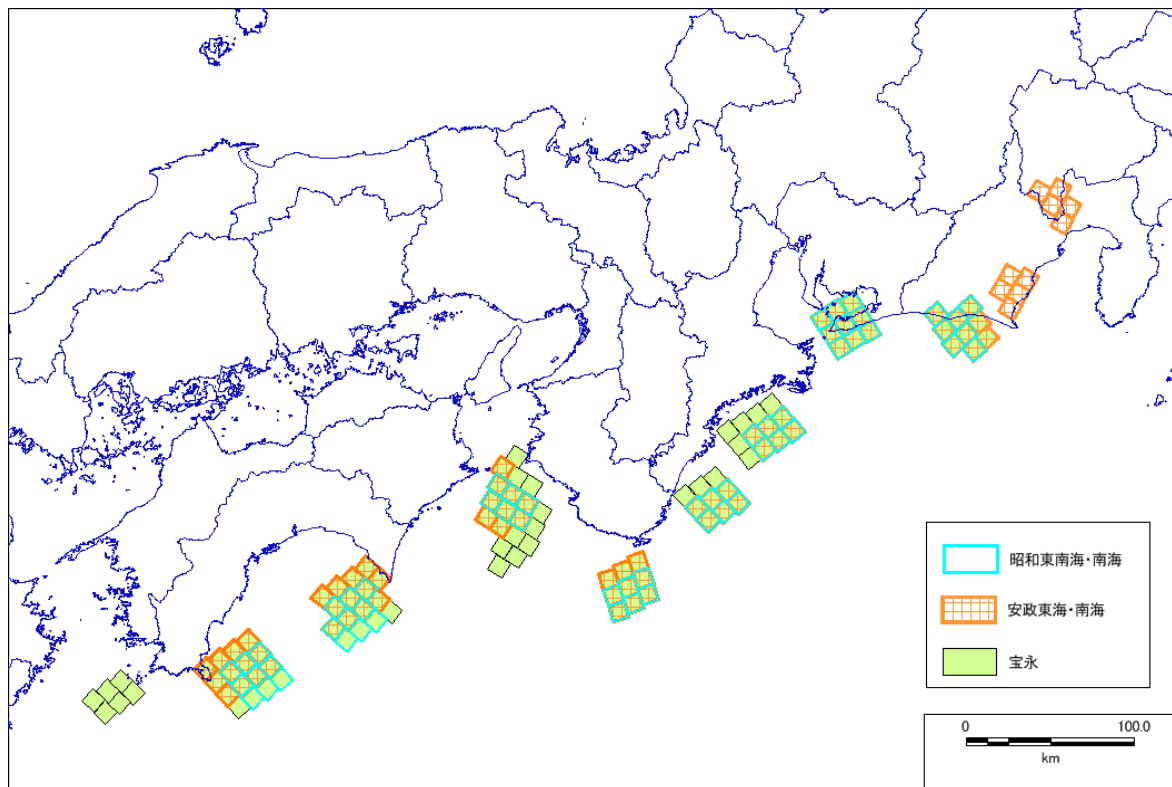


図 4.3.1 長周期地震断層モデルの強震動生成域位置ⁱ

ⁱ 南海トラフの巨大地震モデル検討会，首都直下地震モデル検討会：南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告，2015

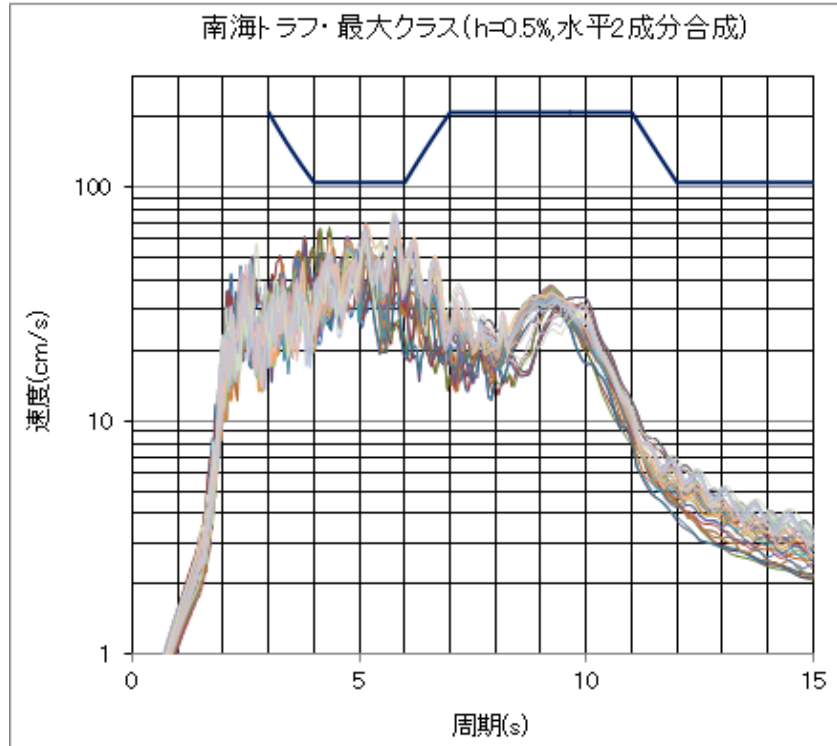


図 4.3.2 最大クラスの地震の速度応答スペクトル (h=0.5%)
(事業所代表メッシュ)

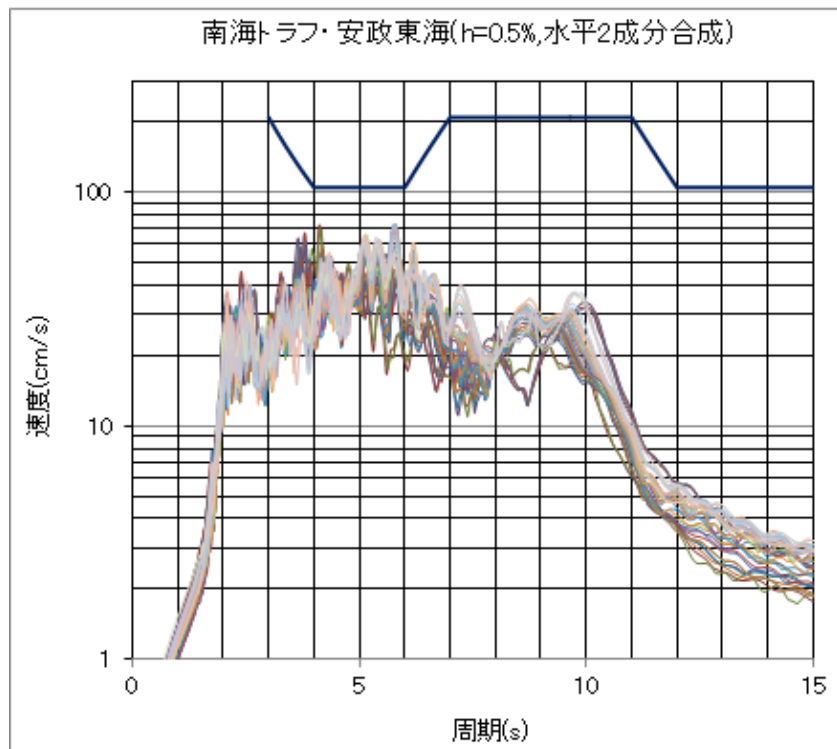


図 4.3.3 1854年安政東海地震の速度応答スペクトル (h=0.5%)
(事業所代表メッシュ)

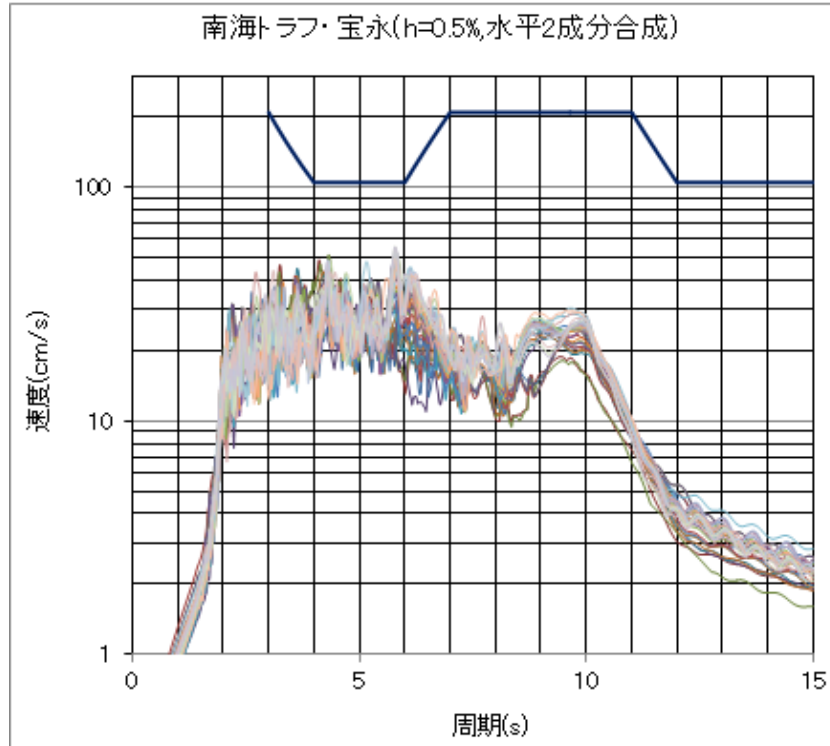


図 4.3.4 1707 年宝永地震の速度応答スペクトル (h=0.5%)
(事業所代表メッシュ)

4.4 スロッシング最大波高の推定

4.4.1 スロッシング最大波高の推定

南海トラフにおける最大クラスの地震を対象として、4.2 項の式(2)、(3)により危険物タンクのスロッシング最大波高を推定する。評価は固有周期 3 秒以上（消防法による液面管理の対象としているタンクとの整合性を図るため）の危険物タンク（平底円筒形）を対象として行い、貯蔵量は満液を想定する。適用する速度応答スペクトルの減衰定数は、危険物タンクの屋根形式により以下の通りとする。ⁱ

- 浮き屋根式タンク（ダブルデッキ）：0.01（1%）
- 浮き屋根式タンク（シングルデッキ）：0.005（0.5%）
- 固定屋根式タンク（内部浮き蓋式）：0.005（0.5%）
- 固定屋根式タンク：0.001（0.1%）

表 4.4.1 及び図 4.4.1～4.4.2 に、危険物タンクのスロッシング最大波高の算定結果を示す。

満液時にスロッシング最大波高が余裕高さを超える可能性のあるタンクは、固定屋根式の準特定タンク 1 基である（準特定タンクは消防法による液面高さ規制の対象外）。

ⁱ 座間信作・他：スロッシングの減衰定数，消防研究所報告，第 98 号，2004

表 4.4.1 南海トラフ・最大クラス地震によるスロッシングⁱ 最大波高とタンク余裕空間高さの比較（満液時）

最大波高 が余裕空 間高さを	特定タンク				準特定タンク			計
	固定屋根	内部浮き 蓋	浮き屋根 (S)	浮き屋根 (D)	固定屋根	内部浮き 蓋	浮き屋 根(S)	
超えない	457	126(78)	246(66)	28	272	31(12)	3	1163(156)
超える					1			1
計	457	126(78)	246(66)	28	273	31(12)	3	1164(156)

注 1) 浮き屋根について、S：シングルデッキ、D：ダブルデッキ（以下同様）。

注 2) 括弧内は浮き屋根/内部浮き蓋の技術基準に未適合のタンク数で、内数である（平成 28 年 3 月末現在）。

注 3) 計算誤差を考慮して、スロッシング最大波高と余裕空間高さとの差が 0.1m より大きい場合に「最大波高が余裕空間高さを超える」とする（以下同様）。

【参考】想定東海地震によるスロッシング被害

参考として、下表に想定東海地震（地震調査研究推進本部、2009）ⁱを対象とした場合の、スロッシング最大波高の評価結果を示す（資料 10 より抜粋）。

参考表 想定東海地震によるスロッシング最大波高とタンク余裕空間高さの比較（満液時）

最大波高 が余裕空 間高さを	特定タンク				準特定タンク			計
	固定屋根	内部浮き 蓋	浮き屋根 (S)	浮き屋根 (D)	固定屋根	内部浮き 蓋	浮き屋 根(S)	
超えない	354	125	225	28	267	31	3	1033
超える	103	1	21	0	6	0	0	131
計	457	126	246	28	273	31	3	1164

注) この評価結果は、平成 21 年度の調査以降の危険物タンクの変更を反映したものである。

ⁱ 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」2009年試作版，2009

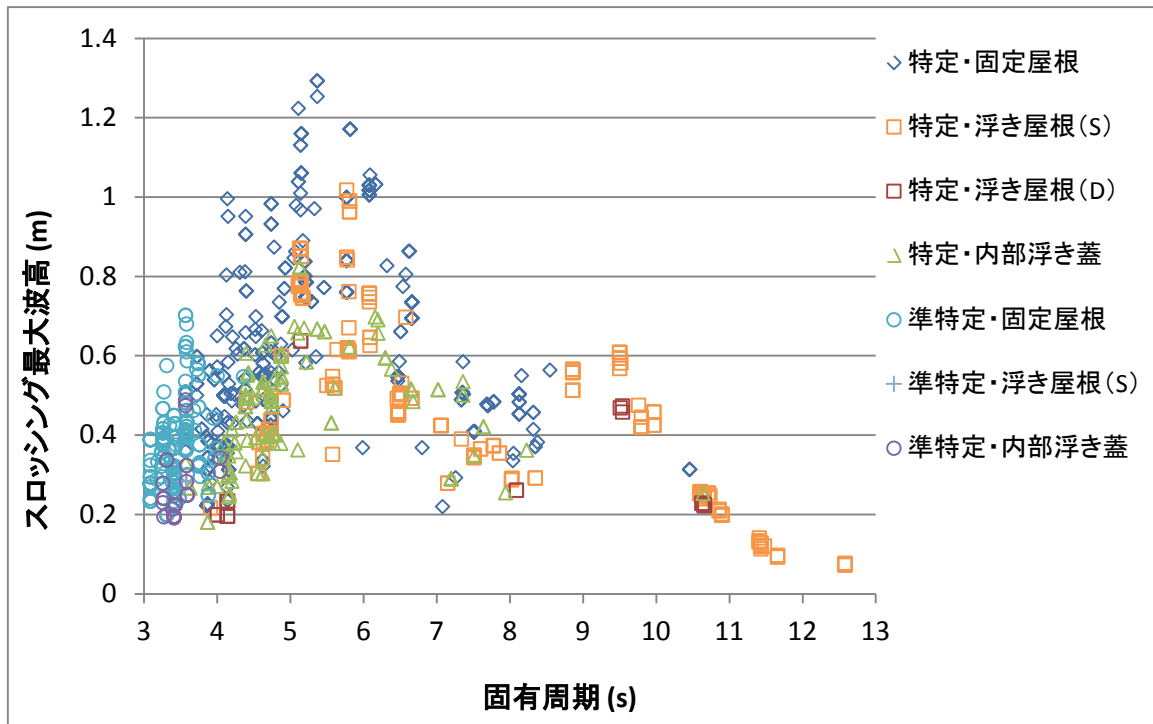


図 4.4.1 スロッシング固有周期(1次)と最大波高 (満液時)

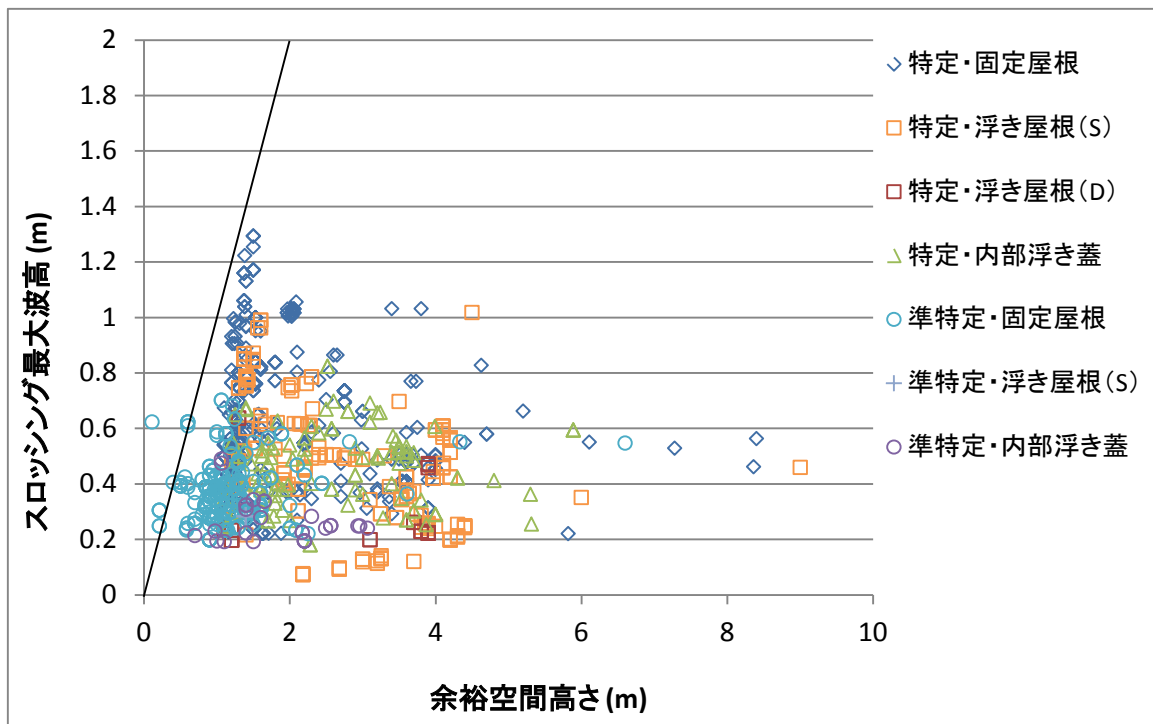


図 4.4.2 タンク余裕空間高さスロッシング最大波高 (満液時)

※直線の上側に位置するタンクは、スロッシング最大波高が余裕空間高さを上回るタンク。

4.4.2 スロッシングによる溢流量の推定

表 4.4.1 において、スロッシング最大波高が余裕高さを超える可能性のあるタンク (1 基) は固定屋根式タンクであり、スロッシングにより液面が揺動して屋根に達したとしても溢流が生じる

とは限らない。しかしながら、危険物タンクは放爆構造（爆発によりタンク内圧が異常に上昇した場合に、内部のガスを上部に放出することができる構造）により、側板と屋根との接合部が弱く作られていることから、念のため屋根部の損傷に注意が必要である。仮に溢流を想定して、タンク満液時における最大溢流量を推定すると、約 11kl となる。

4.5 スロッシングによる災害の危険性

南海トラフ・最大クラスの地震が発生した場合のスロッシング被害については、4.4 項の評価結果を踏まえ、以下のように整理することができる。

(1) 浮き屋根式タンク

満液時においてスロッシング最大波高がタンク高さを上回るタンクはなく、内容物の溢流は想定されない。また、最大波高は 1m 程度であることから、大きな被害に至る危険性は低いと考えられる。

ただし、東日本大震災では、浮き屋根の耐震基準に適合させる必要があり、震災当時未適合であったシングルデッキ型の浮き屋根式タンク 1 基において、地震発生時に浮き屋根上に滞油が認められ、地震の 2 日後に浮き屋根が沈没している。このタンクに作用した地震動は、消防法による基準を下回っていたことが確認されているが、消防庁による浮き屋根ポンツーンの耐震強度の検討の結果、発生応力が許容応力を超えていたこと、2 室破損時におけるポンツーンの浮力が不足していたことが示されているⁱ。

したがって、浮き屋根の技術基準に適合していないタンクについては注意が必要であり、特に引火性の高い第 1 石油類等を貯蔵するタンクは、火災の発生にも留意する必要がある。

(2) 内部浮き蓋式タンク

満液時においてスロッシング最大波高がタンク高さを上回るタンクはなく、最大波高は 0.8m 程度である。したがって、浮き屋根式タンクと同様、大きな被害に至る危険性は低いと考えられるが、浮き蓋の技術基準に適合していないタンクについては注意が必要である。

また、内部浮き蓋式タンクでは、内容物が浮き蓋上へ流出した場合に上部空間に可燃性混合気を形成し、着火・爆発してタンク火災となる可能性があることから、留意する必要がある。

(3) 固定屋根式タンク

満液時にスロッシング最大波高がタンク高さを上回るタンクは、固定屋根式の準特定タンク 1 基である（準特定タンクは消防法による液面高さ規制の対象外）。最大波高は約 0.6m であることから、側板と屋根との接続部を損傷し、内容物が溢流する危険性は低いと考えられるが、念のため注意が必要である。内容物は第 3 石油類であり、万一溢流した場合の着火危険性は低いと考えられる。

ⁱ 消防庁：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討会屋外タンク貯蔵所等分科会，2011

また、以上の評価結果は、南海トラフ・最大クラスの地震による速度応答スペクトルを前提としたものであるが、評価結果には以下に示す不確定要素があり、地震時に実際に生じるスロッシング最大波高は条件によって変化する。

○次に発生する地震の震源域（位置、マグニチュード、震源深さ等）

南海トラフで発生する地震には多様性があり、従来考えられてきたような固有地震モデル（特定の震源域で周期的に地震が発生すると仮定）は必ずしも成立せず、次に発生する地震の震源域を特定することは困難とされているⁱ。したがって、震源域が異なれば、タンクに作用する速度応答スペクトルは変化する。

また、相模トラフで発生する地震による長周期地震動については、現在内閣府による検討が行われているⁱⁱ。現時点では予測結果が公表されていないことから評価を行っていないが、今後公表された場合には改めて確認する必要がある。

○長周期地震動（速度応答スペクトル）の推定精度

想定東海地震の速度応答スペクトル（資料 10）は、図 4.3.2 に示した南海トラフ・最大クラスの地震の速度応答スペクトルと比較して、より大きなものとなっている。しかしながら、予測結果の妥当性についての判断は困難であり、予測結果にはばらつきがあることを考慮する必要があると考えられる。

○地震時のタンク液面高さ

地震発生時におけるタンク液面高さの違いによってスロッシング固有周期が変化し、タンクに作用する速度応答スペクトル、スロッシング最大波高が変化する。下表は、南海トラフ・最大クラスの地震により満液時に最大のスロッシング波高が想定される浮き屋根式タンクを例にとり、液面高さによるスロッシング最大波高の変化を試算したものである。

参考表 タンク液面高さとしロッシング最大波高

液面高さ (m)	固有周期 (s)	速度応答スペクトル (cm/s)	最大波高 (m)
12.4 (満液時)	5.15	81.6	1.1
10	5.26	64.3	0.8
8	5.46	47.5	0.6
6	5.87	60.7	0.7
4	6.74	48.4	0.5

ⁱ 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版），2013

ⁱⁱ 内閣府：相模トラフ沿いの巨大地震等による長周期地震動検討会

