

第4章 長周期地震動による災害評価

4.1 東日本大震災における長周期地震動による被害

4.1.1 浮き屋根上への漏洩

東日本大震災では、3月22日に、仙台地区の事業所において、屋外タンク貯蔵所(塩釜地区消防事務組合管内)(原油 許可容量 65,700 kL 内容量 55,000kL)の浮き屋根上に滞油が確認(図 4.1.1)されたが、調査の結果、ほとんどが水と判明した。

原因は、雨水管の元弁が閉鎖されていたため、雨水が排水されず浮き屋根上に溜まり、若干のスロッシングによる溢流により原油の油膜が雨水の表面に形成されたもので、火災等は発生していない。

なお、本事案について事業所では、「大容量泡放射システム」の出動を要請している。

(下図は仙台市消防局からの提供)



図 4.1.1 浮き屋根上に原油溢流疑いの事例

4.1.2 タンク付属設備の被害

東日本大震災では、ローリングラダーが脱輪(図 4.1.2)したり、浮き屋根本体が揺られたことにより浮き屋根回転止めが引きつられタンク側板が変形(図 4.1.3)する事例等があったが、火災等の災害には至らなかった。

ローリングラダーが脱輪することにより、場合によっては浮き屋根本体が破損、溢流、浮き屋根沈降、最悪火災と至る危険性もあったと考えられる。

また、ウエザーシールがはずれたこと(図 4.1.4)等に対しては、シール部に異常が発生し、万一着火すると、タンク火災に至る危険性もあったと考えられる。

さらに、ポンツーン蓋が離脱(図 4.1.5)したことに対しては、浮き屋根上に溢流した油がポンツーン内に流入する恐れがあり、その流入量によってはポンツーンの浮力を喪失し、他のタンクへ油を緊急移送できない状況の場合は、浮き屋根が沈降しタンク全面火災に至る危険性もあったと考えられる。

(下図は仙台市消防局からの提供)



図 4.1.2 ローリンググラダーの脱輪



図 4.1.3 浮き屋根回転止め、側板の変形



図 4.1.4 ウエザーシールのはずれ



図 4.1.5 ポンツーン蓋の離脱

4.1.3 タンク内のドレン配管の破損

東日本大震災では、タンク内ドレン配管の損傷によるタンク内容物の流出は確認されていない。

4.2 想定する災害シナリオ

4.2.1 浮き屋根式タンク

指針に示されている、長周期地震動による浮き屋根式タンクの下記初期事象による災害シナリオを図 4.2.1 から図 4.2.3 までに示す。

- 浮き屋根上への流出
- 浮き屋根の損傷・沈降
- タンク内のドレン配管の破損

浮き屋根式タンクでは、大きなスロッシングが励起されると、余裕空間高さを上回り内容物が溢流する可能性があるほか、浮き屋根が上部構造物に衝突し、それが起因して内容物に着火することにより、リム火災が発生する可能性がある。

また、何らかの理由により、リム火災が発生した場合、消火設備が機能しない、もしくは、消火活動

ができない事態となれば、リング火災に進展し、その後、浮き屋根が沈降した場合は、タンク全面火災となる。

さらにタンク全面火災が長時間にわたり継続した場合、ボイルオーバーが発生し防油堤内火災をも引き起こす等恐れがある。

一方、溢流がない場合でも、ゲージポールや浮き屋根の変形・破損、浮き屋根上への油の滞留、浮き屋根の沈降等が生じる恐れがあり、被害の状況に応じリム火災、リング火災、タンク全面火災の発生も考えられる。

さらに、タンク全面火災が発生し長時間にわたり継続した場合、ボイルオーバーが発生し防油堤内火災をも引き起こす恐れがある。

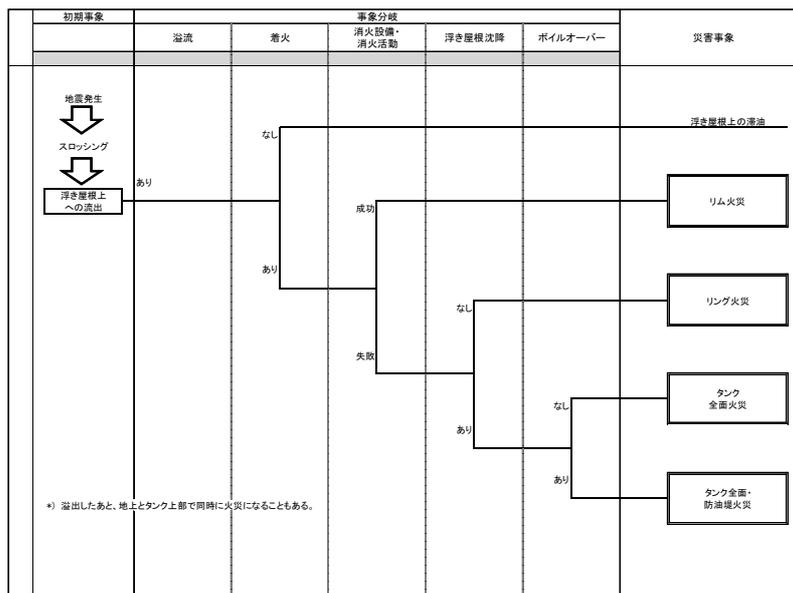
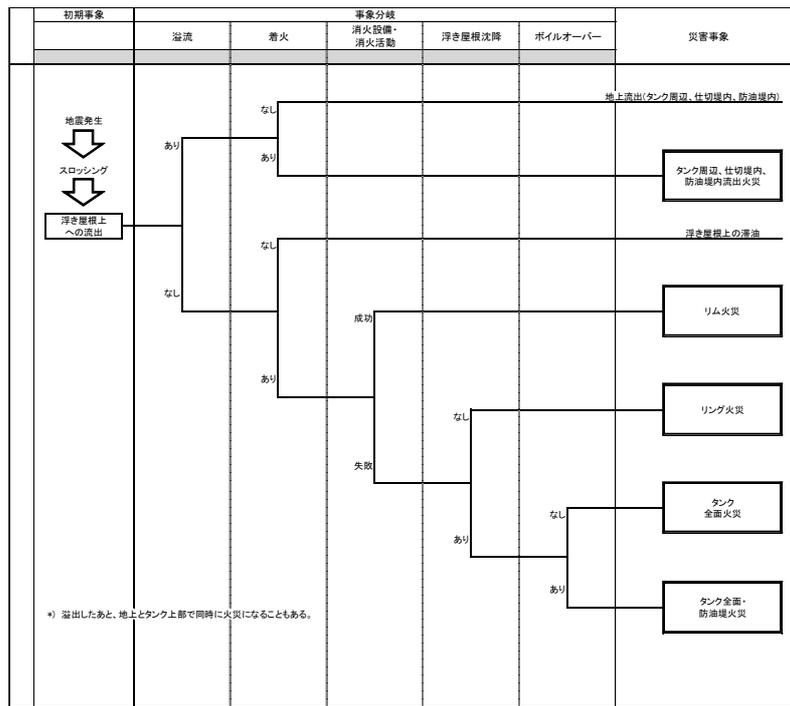


図 4.2.1 浮き屋根上への流出による災害シナリオ

浮き屋根の破損・沈降が発生し、着火した場合、タンク全面火災となり、さらにタンク全面火災が長時間にわたり継続した場合、ボイルオーバーが発生し防油堤内火災をも引き起こす恐れもある。

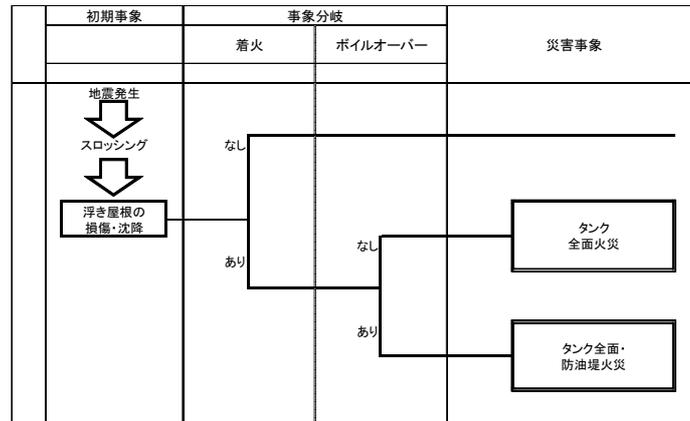


図 4.2.2 浮き屋根の損傷・沈降による災害シナリオ

浮き屋根式タンクでは、浮き屋根上に流出した油がドレン排水口から流出したり、タンク内部でドレン配管が破損してタンク内部の油がドレン排水口から流出したりするような事象が考えられる。前者の場合には、流出量は少量に留まるが、後者の場合は、ドレンバルブの閉止ができなかった際には、大量に流出して仕切堤や防油堤内に滞留することも考えられ、着火した場合、仕切堤内火災や防油堤内火災が発生する。

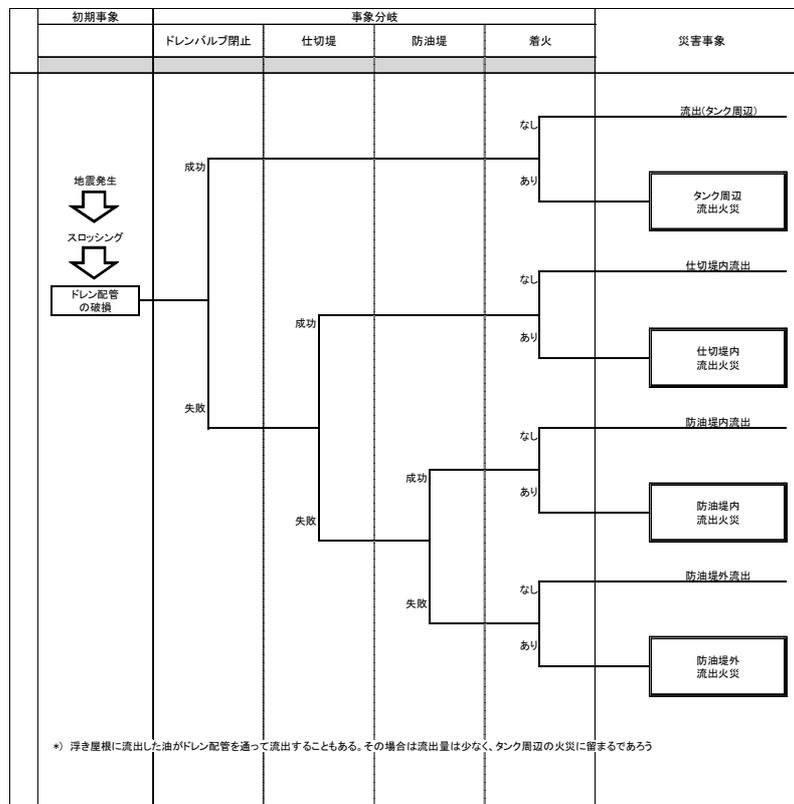


図 4.2.3 タンク内のドレン配管の破損による災害シナリオ

4.2.2 内部浮き蓋付きタンク

指針では、スロッシングによりタンク内の浮き蓋が損傷し、油が浮き蓋上に溢流、あるいは浮き蓋が沈降した場合には、タンク上部の空間に可燃性蒸気が滞留し、通気口からの空気の流入により可燃性ガス濃度が爆発範囲内となって爆発・火災が発生する危険性がある、としている。また、2003年十勝沖地震での内部浮き蓋付きタンクの被害では、スロッシング波高が2m以上になると被害が顕著になることが確認されている¹。

内部浮き蓋付きタンクでは、スロッシングにより、浮き蓋が損傷・沈降し、着火した場合、消火設備等が機能しないと、タンク全面火災に至る可能性がある。さらに、タンク全面火災が長時間にわたり継続すると、ボイルオーバーが発生し、防油堤内火災をも引き起こす恐れがある。

図 4.2.4 に指針に示されている長周期地震動による浮き蓋の損傷・沈降による災害シナリオを示す。

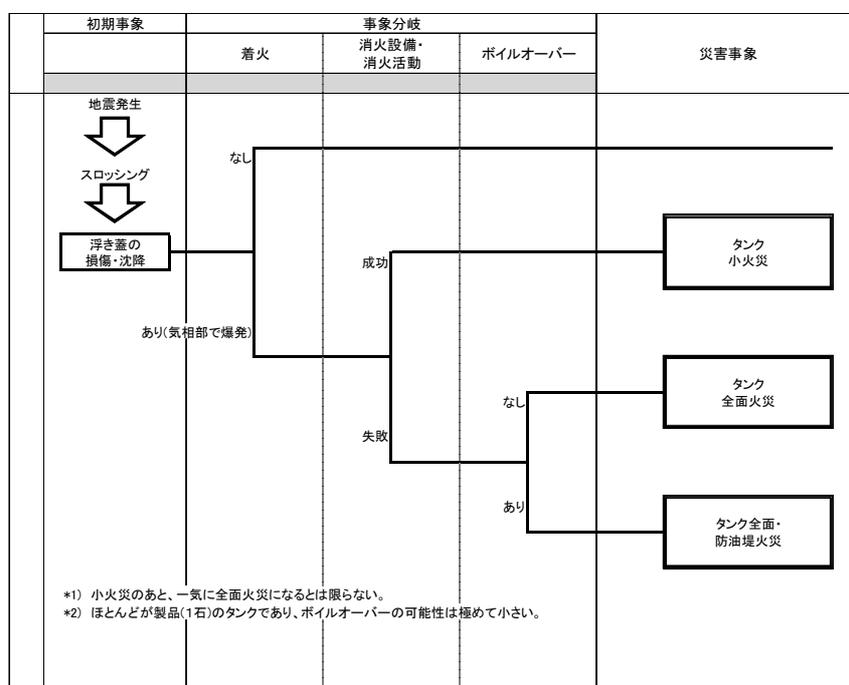


図 4.2.4 浮き蓋の損傷・沈降による災害シナリオ

¹ 消防庁危険物保安室：内部浮き蓋付き屋外貯蔵タンクの安全対策に関する検討報告書、2011

4.2.3 固定屋根式タンク

固定屋根式タンクの屋根は、放爆構造がとられていることから、スロッシングにより内容物が屋根に衝突すると、側板との接合部が破損し、内容物が溢流する可能性がある。

指針では、このような事例は、1964年の新潟地震で確認されており、容量 20,000kL、直径約 45m の固定屋根式タンク 2 基において、総量約 2,000kL の重油が防油堤内に溢流している、としているが、東日本大震災では同様の被害は確認されていない。

固定屋根式タンクでは、タンク上部が破損し、着火した場合タンク小火災が発生し、消火設備等が機能しない場合には、タンク全面火災に至る恐れがある。さらに、タンク全面火災が長時間にわたり継続すると、ボイルオーバーが発生し、防油堤内火災をも引き起こす恐れがある。

図 4.2.5 に指針に示されている長周期地震動によるタンク上部の損傷による災害シナリオを示す。

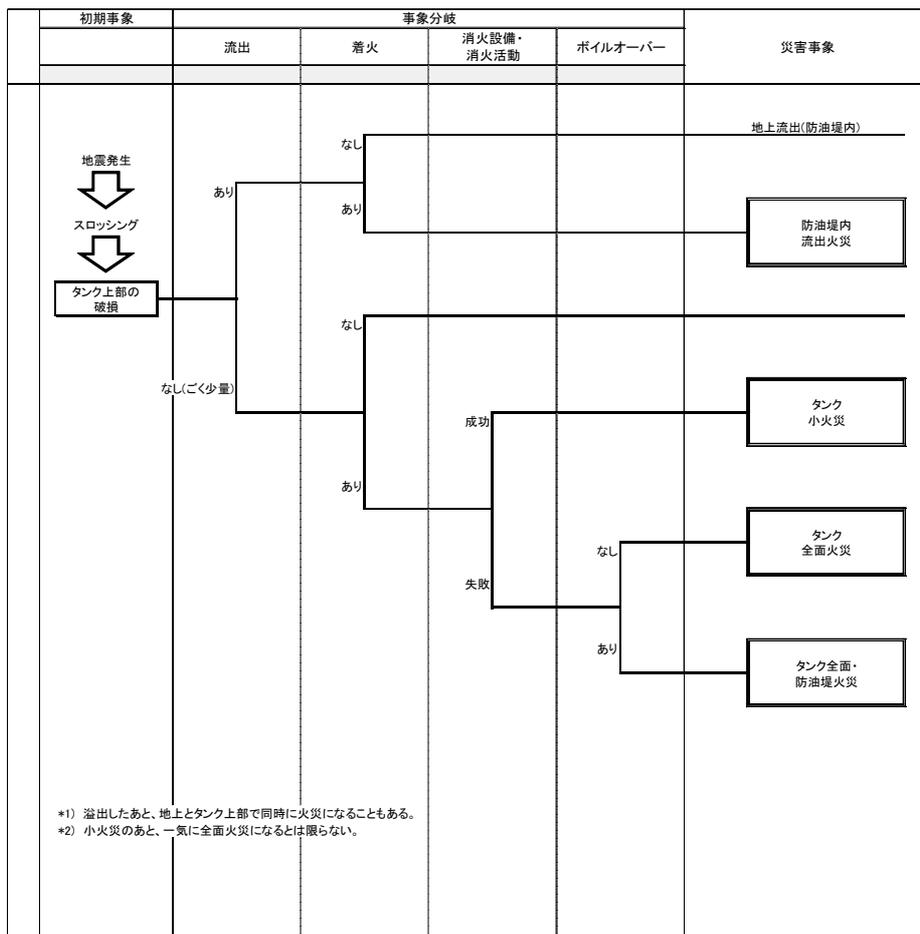


図 4.2.5 タンク上部の破損による災害シナリオ

4.3 長周期地震動による被害の評価方法

4.3.1 スロッシングによる最大波高の推定及び溢流量の算定

浮き屋根式タンク、内部浮き蓋付きタンク、固定屋根式タンクを対象として、速度応答スペクトル法を基にスロッシングによる溢流危険性を評価する。速度応答スペクトルとは、いろいろな固有周期を持つさまざまな建物や構造物に対して、地震動がどの程度の強さの揺れを生じさせるかを示すもので、建物や構造物と同じ特性（固有周期と減衰定数）を持つ揺れの最大値として算定される。

速度応答スペクトル法の評価式を以下に示す。

$$\eta = 0.837 (D/2g) (2\pi/T_s) S_v(T_s) \quad (\text{式1})$$

$$T_s = 2\pi \{ (D/3.682g) \coth(3.682H/D) \}^{1/2} \quad (\text{式2})$$

η : スロッシング最大波高 (m)

T_s : タンクのスロッシング基本固有周期 (s)

D : タンク内径 (m)

H : 液面高さ (m)

g : 重力加速度 (9.8m/s²)

$S_v(T_s)$: 周期 T_s における速度応答スペクトル (m/s)

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 η_+ は、西晴樹ら²により次式が提案されており、2003年十勝沖地震での事例から適用性が確認されている。

$$\eta_+ = \eta + \Delta \eta$$

$$\Delta \eta = 0.91R(\eta/R)^2 \quad (\text{式3})$$

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)

また、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)、スロッシングによる液面減少高さ(溢流により減少した液レベル)を Δ とすると、溢流体積(δv)が式4で表される。

² 石油タンクのスロッシングによる溢流量の算定 (圧力技術第46巻第5号)

$$\delta_v = \delta_h \cdot (R - r_0) \cdot R \theta_0 \quad (\text{式4})$$

δ_v : 溢流体積 (図 4.3.1の斜線で示す部分)

δ_h : 溢流高さ

r_0 : タンク側板高さにおける $\theta = 0^\circ$ の半径との交点

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

また、無次元液面減少高さ Δ/R は、 δ_v/R^3 の一次近似式として式 5 であらわされ、

$$\Delta/R = \alpha \cdot \delta_v/R^3 = \alpha \cdot \delta_h/R \cdot (R - r_0)/R \cdot \theta_0 \quad (\text{式5})$$

α : 比例係数(自由液面 : 0.659、浮屋根 : 0.4023)

任意の半径と周方向角度の液面の鉛直変位は、線形解 η 、非線形液面増分 $\Delta \eta$ を用いると式 6 であらわされる。

$$\eta^+(r, \theta) = \eta^{(1)\max} \cdot J_1(\varepsilon_1 \cdot r/R) / J_1(\varepsilon_1) \cdot \cos \theta + r/R \cdot \Delta \eta \cdot \cos 2\theta \quad (\text{式6})$$

J_1 : 第 1 種ベッセル関数(1 次)

ε_1 : J_1 の $dJ_1(x)/dx=0$ の 1 番目の正根 (=1.84118)

式 6 において、 r^0 は $\eta^+(r_0, 0) = H_c$ を、 θ_0 は $\eta^+(R, \theta_0) = H_c$ を解くことによって、溢流量は式 7 により求められる。

$$\begin{aligned} \Delta v &= (R^2 \pi) \cdot \Delta \\ &= (R^2 \pi) \cdot (\alpha \cdot \delta_v / R^2) \\ &= (R^2 \pi) \cdot (\alpha \cdot \delta_h \cdot (R - r_0) \cdot \theta_0 / R) \end{aligned} \quad (\text{式7})$$

Δ : スロッシングによる液面減少高さ

α : 0.4023 (浮屋根)

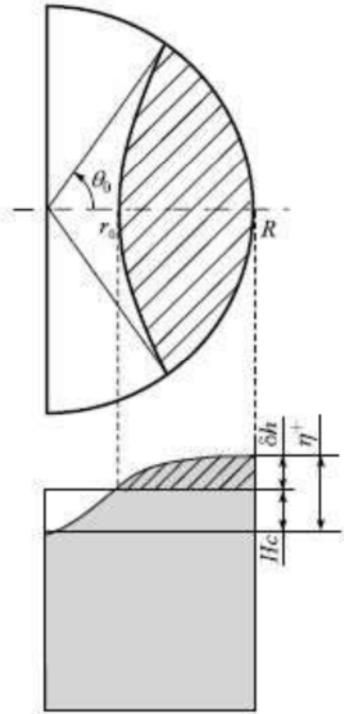


図 4.3.1 非線形スロッシングによる溢流量の模式図

4.3.2 速度応答スペクトルの設定

長周期地震動による災害評価で使用する速度応答スペクトルは、仙台地区においては、「参考資料2 東北地方太平洋沖地震(M9.0)における地震動」に示す方法で推定した地震動から変換処理を行ったものを、塩釜地区においては、独立行政法人防災科学技術研究所 K-NET の観測地点 MYG012 で観測された地震動を用いた。表 4.3.1 に評価に用いた速度応答スペクトルの内容、図 4.3.2 及び図 4.3.3 に各地区の速度応答スペクトルを示す。

表 4.3.1 評価に用いた速度応答スペクトル

地区名称	事業所名称	評価に用いた速度応答スペクトル
仙 台	J X 日 鉱 日 石 エ ネ ル ギ ー (株) 仙 台 製 油 所	「参考資料 2 東北地方太平洋沖地震 (M9.0)における地震動に示す方法」で推定した地震動から変換処理を行った推定波
	全農エネルギー(株)仙台石油基地	
塩 釜	EMGマーケティング合同会社塩釜油槽所	独立行政法人防災科学技術研究所 K-NET の観測地点 MYG012 での観測波
	カメイ株式会社 塩釜貞山油槽所	
	出光興産(株)塩釜油槽所	
	昭和シェル石油(株)塩釜油槽所	
	東西オイルターミナル(株)塩釜油槽所	
	富士興産 (株) 塩釜油槽所	

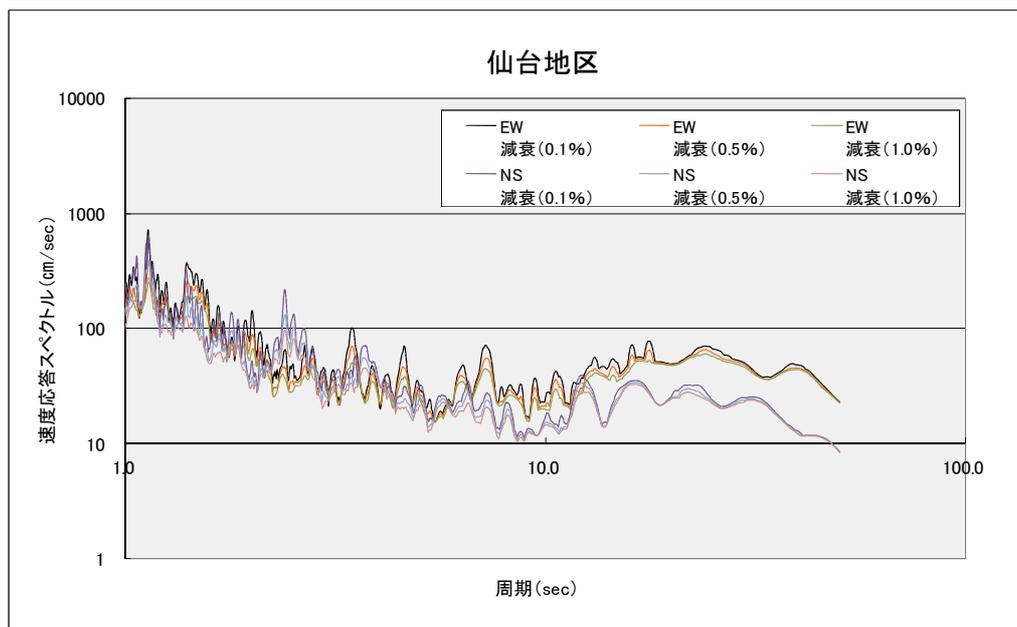


図 4.3.2 速度応答スペクトル(仙台地区)

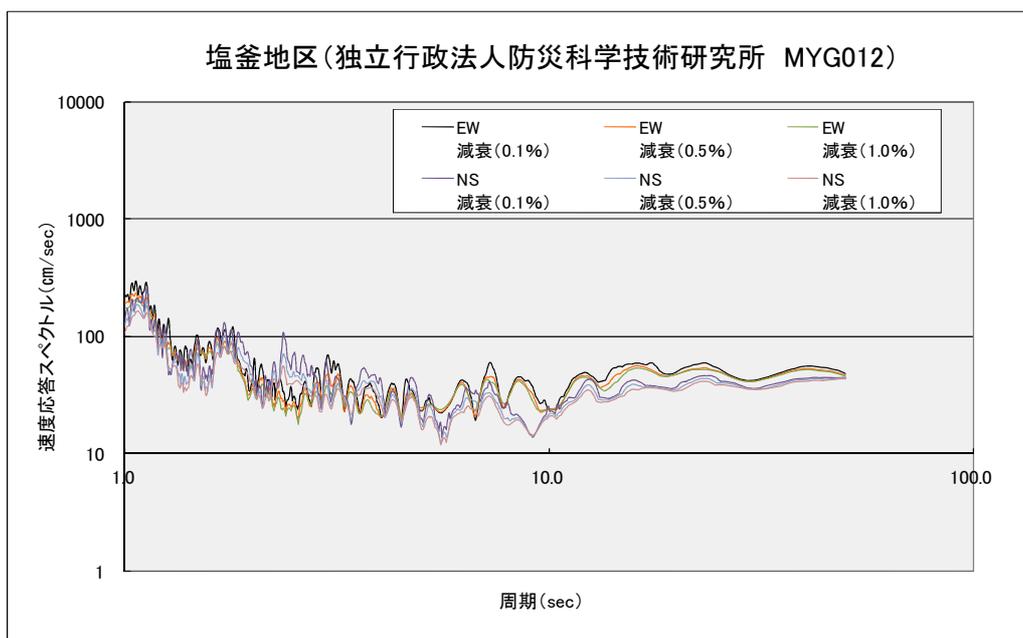


図 4.3.3 速度応答スペクトル(塩釜地区)

4.4 スロッシング最大波高の算定

スロッシング最大波高の算定に用いる液面高さを、事業所アンケート調査で回答された自主管理の液面高さの上限値とした。

特定事業所における 10,000kL を目安とした貯蔵量別、固有周期別の危険物タンク数を表 4.4.1 及び表 4.4.2 に示す。

表 4.4.1 特定事業所における貯蔵量別危険物タンク数

地区名称	貯蔵量別危険物タンク数		総計
	500kL 以上 10,000kL 未満	10,000kL 以上	
仙台地区	25	54	79
塩釜地区	81	0	81
計	106	54	160

表 4.4.2 特定事業所における固有周期別危険物タンク数

地区名称	固有周期別危険物タンク数			総計
	5 (sec) 未満	5 (sec) 以上 10 (sec) 未満	10 (sec) 以上	
仙台地区	11	62	6	79
塩釜地区	81	0	0	81
計	92	62	6	160

図 4.4.1 に危険物タンクのスロッシング波高の頻度分布を示す。

評価対象である危険物タンクのスロッシング波高の最大値は約 1.2 m で、1.0m を超えるタンクは 5 基であり、0.5m 以上 1.0m 未満のタンクは 86 基、0.5m 未満のタンクは 69 基あるが、いずれも、スロッシング波高がタンクの余裕空間高を超えるタンクはない。

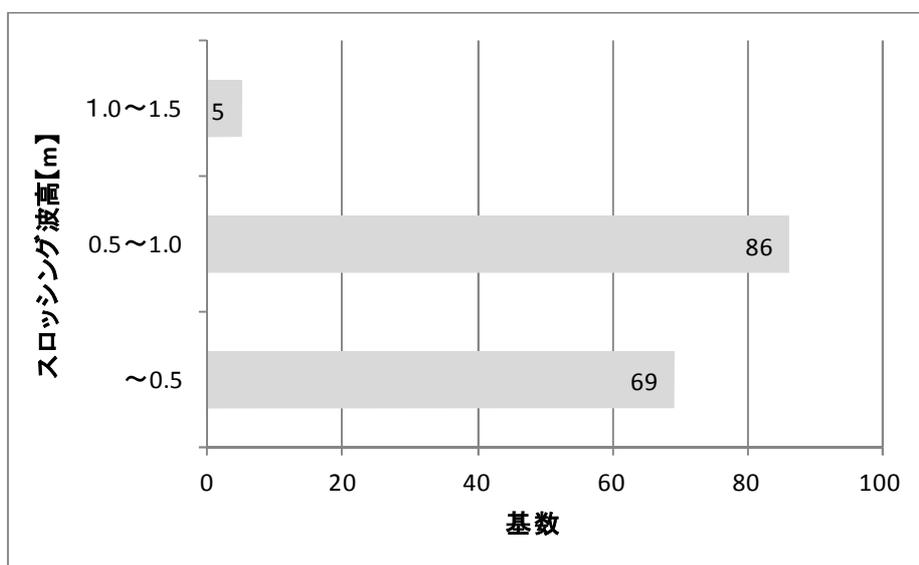


図 4.4.1 危険物タンクのスロッシング波高の頻度分布

4.5 浮き屋根式タンクの災害想定

2003年十勝沖地震の被害事例では、浮き屋根等の破損に関して、シングルデッキ浮き屋根式タンクの危険性が高いこと、スロッシング波高が2mを超えると同じく危険性が高いことなどが報告されている³が、本調査結果ではスロッシング波高は最大1.2mであることから、スロッシングによる被害（溢流、浮き屋根損傷等）の可能性は低いと考えられる。

ただし上述のとおり、東日本大震災では、ローリングラダーが脱輪する等のタンクの付属設備の被害が発生していることから、それらに起因する火災の懸念も全くないわけではないことに留意することが必要である。

なお、石油タンクのスロッシングが浮き屋根に与える影響に関する最近の研究によれば、消防法で取り扱われていないスロッシングの非線形性が、浮き屋根ポンツーンに作用する応力に強く影響する場合があります⁴、スロッシング最大波高だけで災害想定を限定することは危険であると考えておいた方がよい。従って、浮き屋根の破損、沈降、タンク全面火災という災害シナリオ等も考えておくべきと思われる。このことは、次節4.6の内部浮き蓋付きタンクについても同様である。

4.6 内部浮き蓋付きタンクの災害想定

4.2.2に示したように、指針では、2003年十勝沖地震での内部浮き蓋付きタンクは、浮き屋根式タンクと同様にスロッシング波高が2m以上になると被害が顕著になることが確認されている⁵。

評価対象の内部浮き蓋付きタンクでは、他の屋根構造のタンクも含め、スロッシング波高が2mを超えるものはないことから、タンク火災が発生する可能性は低いと考えられる。

4.7 固定屋根式タンクの災害想定

4.2.3に示したように、指針では、1964年の新潟地震で、容量20,000kL、直径約45mの固定屋根式タンク2基において、総量約2,000kLの重油が防油堤内に溢流した、としている。

このときのスロッシング最大波高は3m（推定値）、液面上の空間高さは約2mであった。

また、2003年十勝沖地震でも、固定屋根式タンク1基において、側板と屋根接合部を突き破って溢流する事例が確認されている⁶。

評価対象の固定屋根式タンクに対しては、スロッシング最大波高は空間余裕高さ以下と推定されており、液面が固定屋根には届かないことから、油の溢流やタンク火災の発生の可能性は低いと考えられる。

³ 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)

⁴ 松井徹哉、永谷隆志：長周期地震動を受ける大型円筒浮屋根貯槽の非線形スロッシング挙動、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、2923-2932、2014

⁵ 消防庁危険物保安室：内部浮き蓋付き屋外貯蔵タンクの安全対策に関する検討報告書、2011

⁶ 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—、2005