

長周期地震動による石油タンクのスロッシング危険度

上田 英臣¹・山崎 文雄²・リュウ ウェン³

¹学生会員 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail: h.ueda@chiba-u.jp

²正会員 千葉大学大学院 工学研究科 教授 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail: fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

³正会員 千葉大学 大学院工学研究科 助教 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail: wen.liu@chiba-u.jp

日本各地には、石油を備蓄するタンクが複数設置されている。タンクの固有周期は直径と液深により計算することができ、石油備蓄タンクに限って言えばおよそ5秒から10秒と非常に長い周期となる。そのため、これらは長周期地震動の影響を大きく受け、スロッシングなどにより火災事故が発生する場合がある。本研究では、今後発生が予測されている巨大地震に対してもこうした事故の可能性が高いと考え、長周期地震動が原因となる石油タンクのスロッシング危険度の評価を行った。その際、多数のタンク高さなどを空撮画像から取得する手法を用いて効率化を図った。その後、観測された地震波などを利用してスロッシング波高を計算し、溢流の有無などからそれぞれのタンクの危険性について評価し、タンクデータの妥当性についても検討した。

Key Words: *Petroleum tank, sloshing, long-period ground motion, aerial images*

1. はじめに

日本国内には石油を備蓄するためのタンク基地が各地に設置されており、備蓄は民間・国家の両方で行われている。備蓄には岩盤タンクや洋上タンク、屋根をポンツーンと呼ばれる浮きにより貯蔵液面に浮かせた構造となっている浮き屋根式タンクなどが用いられている。とくに、この中で多く利用されている浮き屋根式タンクは、石油備蓄をするための最も主流なタンクであると言える。この浮き屋根式タンクは、本研究で取り上げる京葉臨海コンビナート地域だけでも優に100を超えており、これまでに巨大地震が発生した際には、こうしたタンクのいくつかが火災事故を起こしている^{2,5)}。火災が起きるのは、タンク貯蔵液が地震によりスロッシングを起こし、液が溢れ出した後で、静電気や浮き屋根と側壁が衝突することにより発生する火花が原因となって着火するためである。

スロッシングの大きな要因となっているのが、巨大地震の長周期成分と巨大タンクの固有周期の長さである。固有周期はタンクの直径と液深により求めることができるが、およそ5秒から10秒前後となるものがほとんどであ

る。貯蔵されている液深が変化するたびに周期が変わることや、こうしたタンクが多数並んでいることを考えると、いくつかのタンクは地震波の影響を大きく受けしてしまうことが考えられる。

本研究では、タンク火災の事故を減らすために浮き屋根式タンクのスロッシング評価を京葉臨海コンビナート地域の一部に対して行った。そして、防災面での対策を提示し、スロッシング評価の際に必要なタンク情報の構築について2つの手法を提案し考察した。

2. 研究手順

(1) 空撮画像からのタンク情報取得

スロッシング評価を行うためにはタンクの高さ、直径、液深を把握していなければならない。本研究では必要となるタンク情報を空撮画像から求める以下の手法2つを使用し比較した。

a) 影の長さからのタンク高さ計算

空撮画像に写りこんでいる影の長さから建物高さを推定する式 (1) を用いて、タンクの高さを計算した^{6,7)}。



図-1 空撮画像でのそれぞれの位置関係

この式において、 L_{is} 、 λ 、 λ' 、 α 、 α' は順に、タンク頂部からその頂部の影までの長さ、衛星高度、太陽高度、衛星方位角、太陽方位角としている（図-1）。

$$H = \frac{L_{is}}{\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \lambda'} + \frac{1}{\tan^2 \lambda} - \frac{2 \cos(\alpha - \alpha')}{\tan \lambda' \tan \lambda}}} \quad (1)$$

b) SfMによる3次元モデルからの高さ推定

SfM (Structure from motion)ソフトウェアであるAgisoft PhotoScanを用いることにより、多方面からの空撮画像から3次元モデルを構築することが可能である⁸⁾。この手法では、上記の手法において必要となる撮影位置などの情報がない場合でも高さを推定することが可能であり、作業面においても効率的な手法となる。本研究では3Dモデル化したデータをDSMとして出力し高さを計算した。

(2) スロッシング高さの計算

得られたタンク情報からスロッシングの計算を行い溢流の有無などを計算する。その際の計算は、西ら⁹⁾により示された式を使用して計算を行った。まず、タンクの固有周期 T_s 、スロッシング高さの線形解 η はそれぞれ以下の式となる。

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

$$\eta = 0.837 \cdot \frac{2\pi}{T_s} \cdot \frac{D}{2g} \cdot S_v(T_s) \quad (3)$$

式(2),(3)において D 、 H 、 g 、 $S_v(T_s)$ は順番に、タンク直径、液深、重力加速度、周期 T_s における速度応答スペクトルを表している。そして、溢流を起こすような大きなスロッシングの場合は、非線形性を考慮した波高増分を考慮する必要があり、その補正值 $\Delta\eta$ は実験値より、

$$\Delta\eta = 0.91 \cdot R \cdot \left(\frac{\eta}{R}\right)^2 \quad (4)$$

として求められ、結局最大のスロッシング波高 η^+ は、

$$\eta^+ = \eta + \Delta\eta \quad (5)$$

として求めることができる。

スロッシング高さの計算結果より、タンク側壁の高さを超える結果となった場合は、その溢流量を計算する必要がある。それらは次式(6)で求めることができる。

$$\Delta v = (R^2 \pi) \cdot \frac{\alpha \cdot \delta h \cdot (R - r_0) \cdot \theta_0}{R} \quad (6)$$

この式において、 α は比例係数であり、自由液面の場合では0.659、浮き屋根の場合では0.4023である。その他、 δh は溢流高さ、 r_0 はタンク側板高さにおける $\theta=0^\circ$ の半径との交点、 θ_0 は側板近傍においてスロッシング波高がタンク上部の余裕高さ H_c と等しくなる円周方向角度である。これらの r_0 、 θ_0 は以下の式で $\eta+(r_0, 0)=H_c$ 、 $\eta+(R, \theta_0)=H_c$ を解くことで求められる。式にある J_1 は第一種ベッセル関数（一次）を示している。

$$\eta^+(r, \theta) = \eta \frac{J_1\left(\varepsilon_1 \cdot \frac{r}{R}\right)}{J_1(\varepsilon_1)} \cos \theta + \frac{r}{R} \Delta\eta \cos 2\theta \quad (7)$$

(3) スロッシング危険度の評価

計算結果より、溢流量の値などから火災事故などに繋がる可能性について考察する。溢流するようなスロッシングが発生した場合は、ほとんどの場合で火災事故になることが考えられるが、着火の原因について考慮し、危険度評価^{10),11)}の方法について検討する。

3. 使用した空撮画像と地震波形について

(1) 空撮画像データについて

今回使用した空撮画像は、東北地方太平洋沖大震災後の2011年3月17日に、千葉県によって上空から撮影されたものである(図-2)。この空撮画像から、今回の対象地であるコスモ石油(株)千葉製油所を取り上げ使用した。

(2) 使用した地震波形について

今回のスロッシング計算に使用した地震波形は東北地方太平洋沖地震時に観測された、気象庁(千葉市中央区中央港)¹²⁾、K-NET(市原市姉崎、千葉市中央区千葉港)¹³⁾で観測された波形である。それぞれの観測地の関係を図-2に示す。これを見ると、気象庁中央港とK-NET千葉港の観測地は非常に近いことがわかる。また、それぞれの観測地は、今回の対象地から近い場所で観測されたデータとして決定した。

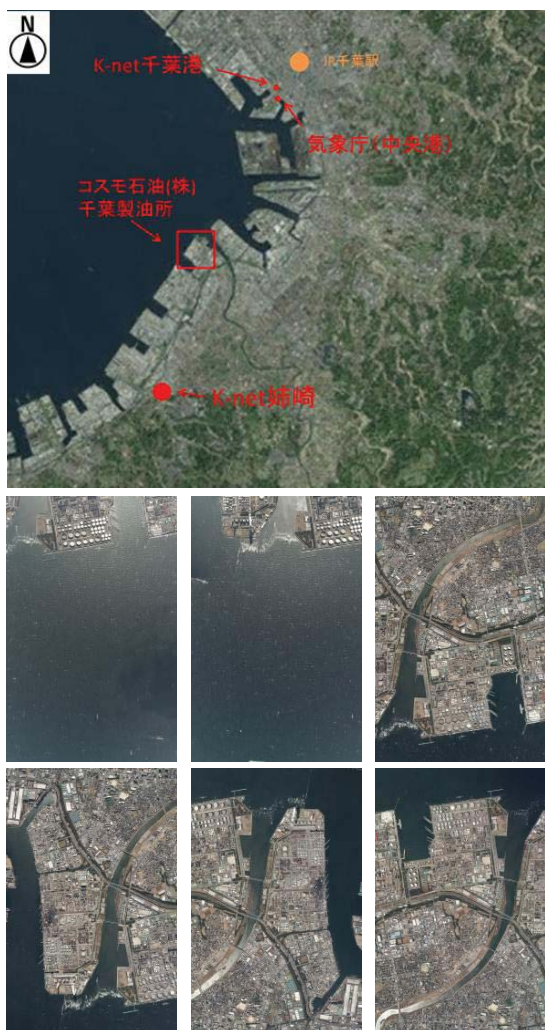


図-2 上：対象地域と地震観測場所，下：空撮画像(2011年3月17日)

4. 計算結果

(1) タンク高さの計算結果

高さの計算を行った、市原市コスモ石油(株)千葉製油所のタンクである、A1~A8, B1~B4, C1~C10とDSMデータを図-3に示す。また、Agisoft PhotoScanを使用して作成した3Dモデルの様子を図-4に示す。3DモデルとDSMデータを見ると、タンクが立ち並ぶ様子は表現できているが、側壁の形成が上手くされていないことがわかる。その他、3D化されていないタンクもあるなど、改善すべき点が多く伺える。一方で液深についてはそれぞれのタンクで上手く形成されていると言えそうである。しかしながら、表-1に示す3Dモデルからのタンク高さの数値を、影長さから計算した値と比較すると、差が大きいことがわかる。影長さからの算出は画像の解像度に依存するが誤差2m以内程度の精度があり、この数値が正確であると仮定すれば、実際のスロッシング計算で3Dモデルから得た数値を使用することは、計算結果が大きすぎる原因となり、正確なスロッシング評価が困難になると

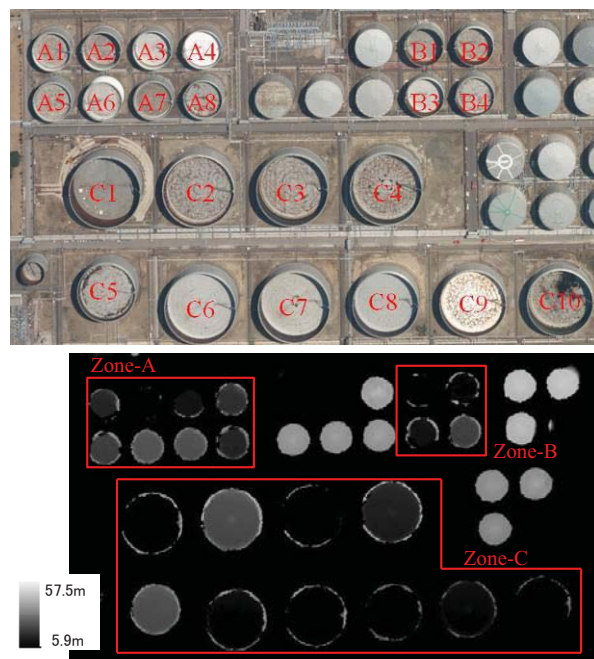


図-3 高さを計算したタンクとDSMデータ



図-4 作成したタンクの3Dモデル

表-1 計算したタンク高さと液深の一覧

タンク種類	影長さからの計算結果		DSMからの計算結果	
	タンク高さ(m)	液深(m)	タンク高さ(m)	液深(m)
tankA1	18.9	9.7	24.5	20.4
tankA2	18.4	3.1	22.0	9.0
tankA3	17.8	6.8	20.0	18.6
tankA4	18.0	9.6	24.9	22.9
tankA5	19.3	12.8	26.0	24.5
tankA6	19.5	15.4	28.4	27.2
tankA7	18.9	13.2	28.3	26.8
tankA8	18.3	11.0	24.4	21.3
tankB1	19.9	3.8	20.4	10.6
tankB2	18.4	6.3	19.9	16.8
tankB3	18.8	8.5	21.5	18.0
tankB4	19.1	12.3	26.8	24.8
tankC1	21.4	1.5	22.6	5.7
tankC2	23.5	16.4	28.0	26.3
tankC3	22.3	6.8	20.1	12.0
tankC4	23.2	11.6	22.8	20.7
tankC5	22.3	17.4	27.7	26.4
tankC6	23.1	11.5	19.1	16.5
tankC7	23.1	7.4	22.0	9.6
tankC8	19.0	5.5	25.8	8.5
tankC9	19.0	10.0	19.9	17.0
tankC10	19.3	3.9	23.1	6.1

考えられる。そのため、スロッシング計算の際のタンク情報として、今回は影長さからの計算で得た値を使用することとした。

今回の結果では3Dモデルから精度の高いタンク情報を取得することができなかったが、タンク情報を構築する手法としては非常に効率的であるため、精度の高い3Dモデルの作成は重要な課題点である。

(2) 速度応答スペクトルの計算

スロッシング波高を求めるために、まず気象庁とK-NETにより観測された波形から、減衰率を0.5%として速度応答スペクトルの計算を行った。

気象庁、K-NETそれぞれの地震波から計算された速度応答スペクトルを図-5、6、7に示す。気象庁中央港での応答スペクトルは、周期1秒前後にピークが表れており、その後10秒程度まで幾つかの周期でピークが見られる。

K-NET姉崎の応答スペクトルでは周期1秒から2秒の間にピークが見られ、それ以上の長周期部分は緩やかに減少している。K-NET千葉港は、気象庁中央港の観測地点と非常に近いため、速度応答スペクトルの値も似た結果となっているが、周期0.5秒から10秒程度まで広範囲で大きな値を示していることがわかる。

(3) スロッシングの計算

計算された速度応答スペクトルからそれぞれのタンクでのスロッシング評価を行う。応答スペクトルの計算を行った地点ごとの計算結果を表-2に示す。

計算結果よりC1のタンクについては固有周期が非常に長くなったため、値なしとしている。大きなスロッシング波高となったものは固有周期が約10秒のタンクであ

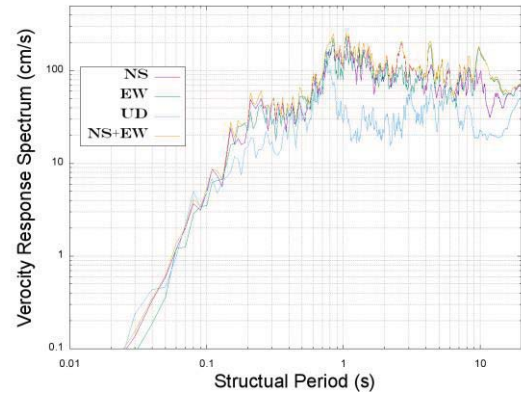


図-5 気象庁中央港の速度応答スペクトル (h=0.5%)

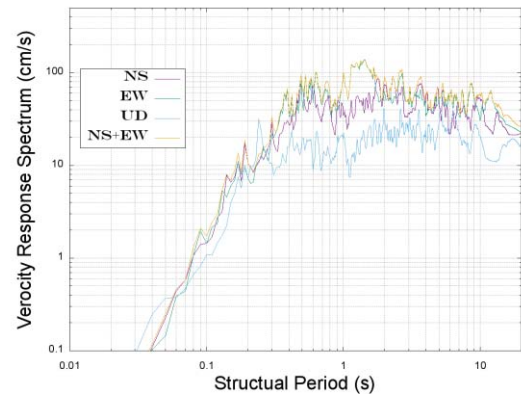


図-6 K-NET 姉崎の速度応答スペクトル (h=0.5%)

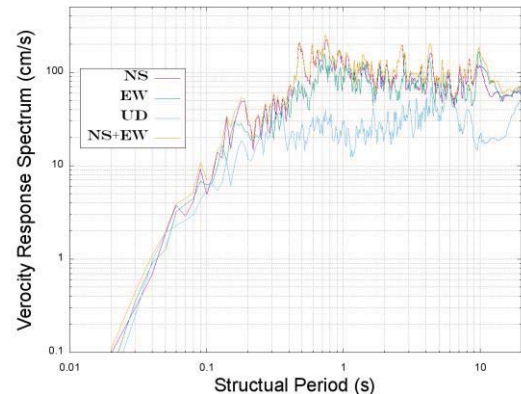


図-7 K-NET 千葉港の速度応答スペクトル (h=0.5%)

った。スロッシング波高としては3mを超えるタンクもあったが、液が溢流するといった結果とはならなかった。実際に東北地方太平洋沖地震の際の報告^{14), 15)}を見てみると、これらのタンクが溢流したという報告は見られなかった。しかし、いくつかのタンクでは浮き屋根の上に貯蔵液が溢れたと報告されている。今回の計算結果で大きなスロッシング波高となったタンク (A3,B2,C5) において、石油が屋根上に溢れだしたかどうかについては、空撮画像から判断することが難しいため確認はないが、大きな影響を受けた可能性は高いといえる。

図-8に今回計算を行ったタンクそれぞれのスロッシング波高についてまとめた。表からも読み取れるが、周期が10秒あたりで波高が大きくなり、それより周期が長く

表-2 速度応答スペクトル $S_v(T_s)$ とスロッシング波高(η^+)

タンク番号	周期(s)	気象庁中央区中央港		k-net姉崎		k-net千葉港	
		NS+EW Sv (cm/s)	η^+ (m)	NS+EW Sv (cm/s)	η^+ (m)	NS+EW Sv (cm/s)	η^+ (m)
tankA1	8.42	121.43	1.81	72.40	1.05	130.42	1.95
tankA2	13.94	71.92	0.63	42.42	0.37	70.00	0.61
tankA3	9.62	170.45	2.26	55.62	0.70	173.82	2.31
tankA4	8.49	101.88	1.50	75.79	1.10	113.34	1.68
tankA5	7.83	93.42	1.50	36.35	0.56	90.12	1.44
tankA6	7.42	75.82	1.25	63.22	1.03	80.72	1.34
tankA7	7.75	100.21	1.62	40.22	0.63	103.26	1.68
tankA8	8.10	111.63	1.73	47.85	0.71	92.88	1.42
tankB1	12.58	79.92	0.78	46.96	0.45	80.98	0.79
tankB2	9.98	165.56	2.11	58.55	0.71	161.81	2.06
tankB3	8.91	86.47	1.20	62.28	0.86	83.67	1.16
tankB4	7.86	95.17	1.51	35.97	0.55	89.82	1.42
tankC1	37.69	-	-	-	-	-	-
tankC2	11.97	83.42	1.59	64.97	1.23	80.14	1.52
tankC3	17.52	65.87	0.85	29.69	0.38	64.04	0.82
tankC4	13.68	78.25	1.30	42.76	0.70	74.86	1.24
tankC5	9.83	177.80	3.49	57.92	1.08	180.81	3.56
tankC6	13.83	74.96	1.23	42.77	0.70	71.55	1.17
tankC7	16.78	58.63	0.79	32.01	0.43	63.98	0.86
tankC8	17.96	66.50	0.77	28.56	0.33	67.12	0.78
tankC9	13.60	79.51	1.23	45.77	0.70	76.70	1.18
tankC10	21.33	65.21	0.64	25.66	0.25	63.12	0.62

なると緩やかに減少していくことがわかる。

今回計算されたタンクの固有周期からはこのような結果となったが、固有周期を求める際の液深は時々刻々と変化するため、その時々で固有周期を計算し、過去に観測された地震波と比較して卓越したスロッシング波高にならないか検討する必要があると考えられる。図-9はTank A1の場合の液深による固有周期の変化である。およそ液深が5m以上の範囲では、固有周期の変化は約3秒である。一方で液深が浅い場合には固有周期が非常に長い計算結果となる。これは周期の計算式に含まれているcoth関数の変数の値が小さくなるほど大きな値を返すためである。液深が浅い場合はスロッシングによる溢流の危険は考慮する必要がないが、液深によりおよそ3秒程度周期がずれることはスロッシング計算結果にも大きく影響を与えるため、液深を正確に把握することは重要な要素となる。

4. スロッシング危険度評価

今回のスロッシング計算の結果より、石油などの溢流がないと求められたので、火災などの危険はあまりなかったと言える。一方で、もし溢流がある場合ではその溢流量を求め、周辺への影響を考えなければならない。通常、タンクの周辺は石油などが溢流した場合に備え防油堤が設けられているが、その許容量を超えないか、何らかの原因で漏れだした場合についても考慮する必要があるだろう。また、最終的に火災になる原因は、静電気や浮き屋根と側壁が擦れて発生する火花などである。とくに火花については、スロッシングが発生した際に、その値が大きいほど、周辺設備と接触する可能性が高くなると予想される。もし溢流するスロッシング波高であるならば、その揺れの方向性によっては、必ず上部に設置さ

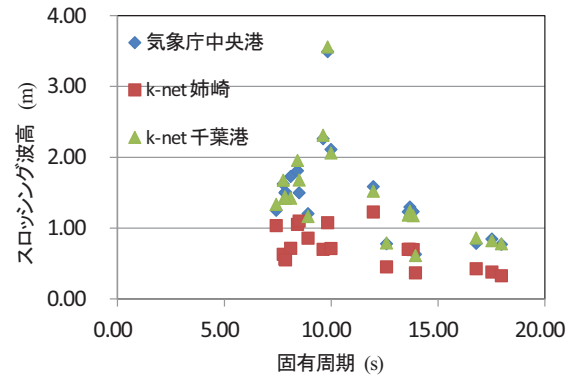


図-8 固有周期とスロッシング波高の関係

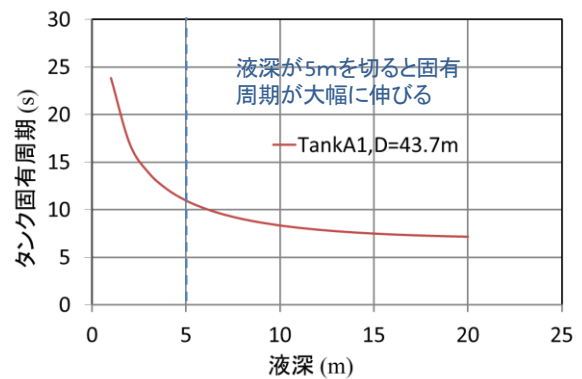


図-9 液深と周期の関係(TankA1,D=43.7mの場合)

れた梯子と接触することになり、その際には梯子の破損・落下などにより、最終的に火災が発生する可能性が高くなると考えられる。

このようなことから、従来の検討に加えてスロッシングの方向性についても考慮していくべきである。ただし、溢流が発生するようなスロッシング波高となった場合は、火災は必然的に起きるものと考え、その後の対策を考える必要がある。

5. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震のコスモ石油(株)千葉製油所近辺で観測された地震波形を使用して、コスモ石油(株)千葉製油所のタンクのスロッシング波高の計算を行った。

タンクの情報取得は空撮画像に写り込んだタンクから求めた。その手法として影の長さから算出する手法を正解データとして構築し、より効率的な手法として3Dモデルからの算出を試験的に試みた。3Dモデルからの算出はソフトウェアの詳細な設定などについて、まだまだ考察していく必要があり、現段階では有益なデータとして使うことはできなかった。しかし、今後精度の高い3Dモデ

ルの構築を考えることは、効率的にタンクデータを整理しスロッシング危険度評価を行う際に非常に有効な手段になると考えられる。

スロッシング波高の計算結果として、最も大きな値は3mを超える結果となった。溢流をするという結果にはならなかったが、3mのスロッシングは石油などが屋根上に漏れ出すことが十分に考えられる値である。当初考えていたとおり、やはり多く立ち並ぶタンクのうちの幾つかは卓越したスロッシング波高となってしまうことが今回の計算結果から明らかとなった。

今後は他の地域についてもこうした検証を行い、傾向を掴んだ上で具体的な対策を考えていく必要があるが、事故対策としては、溢流が発生した場合には必ず火災が発生すると考え対策する必要がある。その他、スロッシングの揺れ方向を考慮し、付随設備と浮き屋根が接触するような場合を避ける設計をすることで、火災事故のリスクを減らすことができると考えられる。

参考文献

- 1) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
http://www.jogmec.go.jp/library/stockpiling_oil_065.html
- 2) 総務省消防庁：出光興産(株)北海道製油所屋外タンク貯蔵所火災の火災原因調査結果, 2004.
- 3) 伊藤英男：消防法令の改正の契機となった地震災害事例,2013.
- 4) 西晴樹：東日本大震災における危険物施設の被害, 予防時報, vol.249, 2012.
- 5) 西晴樹：東北地方太平洋沖地震に伴い発生した製油所火災について,Safety&Tomorrow,No.145,2012.
- 6) 岩崎洋志, リュウ・ウエン, 山崎文雄：光学センサ画像における日影長さと SAR 強度画像における倒れ込み量に基づく建物高さと地震による倒壊の検出, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第6号(特集号), 2012.
- 7) Xiaojing Huang and Leong Keong Kwoh : 3D Building Reconstruction and Visualization for Single High Resolution Satellite Image,IGARSS, pp. 5009-5012,2007.
- 8) 内山庄一郎, 井上公, 鈴木比奈子:SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究, 防災科学技術研究所研究報告, 第81号,2014.
- 9) 西晴樹, 山田實, 座間信作, 独立行政法人防災科学技術研究所, 御子柴正, 箕輪親弘: 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, 2008.
- 10) 消防庁特殊災害室：石油コンビナートの防災アセスメント指針, 2013.
- 11) 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.
- 12) 気象庁強震観測データ(東北地方太平洋沖地震)：
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html?sess=6e1b37b3613bd087e7ce042e42f4670b>
- 13) 防災科学技術研究所: 強震観測網(K-NET, KiK-net)
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 14) 千葉県防災危機管理部消防課 予防・石油コンビナート班：コスモ石油(株)千葉製油所の2つの事故における石油コンビナート等防災本部の活動, 2012.
- 15) 消防研究センター: 第15回消防防災研究講演会資料, 2012.