

—東日本大震災における危険物施設の被害概要—

屋外タンク貯蔵所とその関連設備の被害概要について ～「石巻地区」・「川崎地区」・「市原地区」～

危険物保安技術協会

1 はじめに

東日本大震災における危険物施設の被害状況は、本誌139号の「仙台地区」を第1回目とし、地区別に報告してきましたが、今回紹介する三地区をもって最後となります。今回は、宮城県石巻市を「石巻地区」、神奈川県川崎市を「川崎地区」、千葉縣市原市を「市原地区」と便宜上表記することとし、それぞれの地区の被害状況について報告することとします。石巻地区については、消防研究センターと合同で実施した調査ではなく、当協会の業務の一環で、後述する「A工場」を訪れた際に、調査した結果を報告するものです。

東北太平洋側に位置する「石巻地区」は、同じ地域の「仙台地区」や「久慈地区」と同様、津波による大きな被害を受けています。また、東京湾岸に位置する「川崎地区」と「市原地区」は、日本海側で発生した被害と同様、長周期地震動による浮き屋根等の被害が多く発生しています。

今回紹介する三地区を図1に示します。また、それぞれの事業所の近くで観測された震度を記載します。

震度6弱：宮城県石巻市

震度5強：神奈川県川崎市

震度5弱：千葉縣市原市

2 調査対象

今回紹介する三地区においては、合計9つの事業所の被害調査を実施しました。

「石巻地区」では、図2に示す石巻港に面した



図1

「A工場」の1箇所を調査しました。

「川崎地区」では、図3に示す「B-1製油所」から「E化学会社」までの5箇所を調査しました。なお、川崎地区の「B-1製油所」と「B-2製油所」は同じ会社ですが、それぞれ独立して石油精製事業を営む製油所です。

また、「市原地区」では、図4に示す4つの事業所のうち、「F火力発電所」から「H製油所」までの3箇所を調査しました。「I製油所」については、消防研究センターと合同で現地調査したものではなく、地元消防局を通して得られた情報を元に、被害基数を計上するものです。

それぞれの事業所の被害状況を屋根形式別にとりまとめたものが、表1と表2になります。表1と表2の各事業所の下段には、それぞれの事業所が所有するタンク基数を、上段には、そのうちの「何らかの被害があった」タンク基数を示しています。



図 2

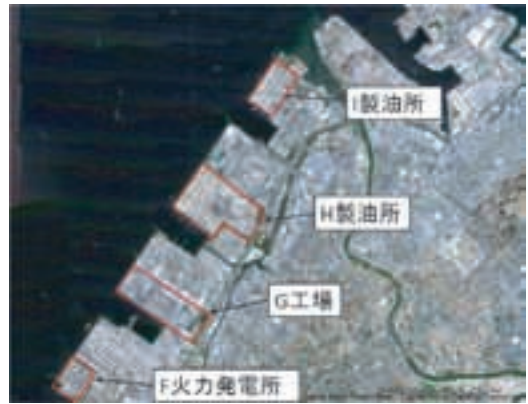


図 4



図 3

表 1 は、石巻地区の被災状況を示したものです。A 工場では、全てのタンクに何らかの被害が発生しています。A 工場が所有する全てのタンクの側板には、保温材が設置されていますが、津波により、全てのタンクに、保温材の損傷がみられました。表 1 では、こうした保温材の被害も含めて「何らかの被害」に基数を計上しています。

また、表 2 は、川崎地区と市原地区における

特定タンクの被害基数を示したものです。川崎地区と市原地区は、準特定タンク以下のタンクも多く設置されていますが、今回の地震で被害を受けたものは、全て特定タンクであったことから、特定タンクのみを基数を計上しています。

3 形態別にみる被害の状況

これ以降、地区ごとに、また、被害の形態別に被災状況を説明することとします。

3. 1 石巻地区

A 工場は、特定屋外貯蔵タンク 3 基と準特定屋外貯蔵タンク 11 基を所有する事業所です。当該事業所では、タンクの移動や側板の変形といった津波による大きな被害が発生しました。津波で受けた被害について、形態別に報告することとします。なお、調査した範囲内では、短周期及び長周期地震動によるタンク被害は、特にみられませんでした。

表 1 所有するタンク基数と「何らかの被害があった」タンク基数（石巻地区）
（上段）：何らかの被害があったタンク基数 （下段）：各事業所が所有するタンク基数

地区	事業所	特定タンク				準特定タンク	計
		固定屋根	浮き屋根 (シングルデッキ)	浮き屋根 (ダブルデッキ)	内部浮き蓋付き 固定屋根	固定屋根	
石巻	A 工場	3	0	0	0	11	14
		3	0	0	0	11	14

表2 所有するタンク基数と「何らかの被害があった」タンク基数（川崎地区及び市原地区）
（上段）：何らかの被害があったタンク基数 （下段）：各事業所が所有するタンク基数

地区	事業所	特定タンク				計
		固定屋根	浮き屋根 (シングルデッキ)	浮き屋根 (ダブルデッキ)	内部浮き蓋付き 固定屋根	
川崎	B-1製油所	0	1	0	0	1
		28	31	0	10	69
	B-2製油所	0	1	0	0	1
		43	21	3	23	90
	C 製油所	1	5	0	0	6
		112	94	3	7	216
	D 油槽所	0	1	0	1	2
		17	2	0	2	21
	E 化学会社	0	4	0	2	6
		18	12	0	7	37
市原	F 火力発電所	0	0	1	0	1
		1	1	5	0	7
	G 工場	0	0	0	1	1
		8	3	0	16	27
	H 製油所	0	5	0	0	5
		33	34	0	8	75
	I 製油所	0	2	0	0	2
		83	46	0	5	134

3. 1. 1 津波による被害

(1) タンクの移動

A 工場のタンクヤードは、港に直面しており、岸壁から約60mの距離に位置しています。図5で示すとおり、タンク A、B、C の3基が、津波により移動しました。

3基のタンクは共に、直径13.56m、許可容量980klの準特定タンクです。図6（事業所提供）は、津波が引いた後に撮影されたタンク A の状況ですが、タンクは流され、防油堤の外まで移動したことがわかります。また、図7と図8に示すタンク B と C は、タンク基礎上にとどまっているものの、共に、押し波の方向に約70cm 移動していました。

タンク側板に設置された保温材の損傷状況等から、当該タンクヤード内には、地盤面より約

4.0m の高さまで津波が来たことが確認されています。タンク基礎高さが地盤面より0.7m の高さであることを考慮すると、タンク本体は底板から約3.3m の高さまで、津波の影響を受けたことがわかります。

ここで、A 工場が所有する14基のタンクのうち、地震当時の貯油量と自重が分かっている9基のタンクについて、浮力と自重のバランスを比較してみることとしました。その結果を表3に示します。

地震当時、タンク A、B、C の3基は、それぞれ約125kl（液位0.866m）、約156kl（液位1.082m）、約129kl（液位0.897m）と、ほぼ同程度の量の油が貯蔵されていました。

単純計算すると、この3基のタンクはそれぞれの自重に対して、発生する浮力が上回る結果



図 5



図 7



図 6 (事業所提供)



図 8

となることから、津波により移動しやすい状態であったことがわかります。一方、移動しなかった残りの6基のタンクをみると、表3の浮力の計算結果と移動しなかったという事実とが、必ずしも一致していないことがわかります。中でも、表3のタンクIは、防油堤外に移動したタンクAの隣に設置され、当時の液位もほぼ同程度であることがわかりますが、タンクは移動することなく、基礎の上にとどまっていました。このように、条件的には同じ2基のタンクですが、発生した事象には、大きな差が生じたこととなります。

タンクが浮き上がってしまう現象を考えてみると、図9に示すとおり、タンク底板下全面に海水が回り込んで始めて浮力が作用し、タンクが浮き上がることとなります。こうしたことを

考えると、津波によるタンクの移動は、どのように底板下に海水が回り込むか、その状況や程度に大きく影響してくるものと思われます。例えば、側板重量の違いによるタンク底板と基礎との密着程度の差や底板外張り出し部の雨水浸入防止材の設置状態等、さまざまな状況・要因が関係してくるものと考えられます。その他、タンクが津波の波力をどのような状態で受けるのかも影響してくるものと考えられます。例えば、タンクの設置場所や周囲の状況等、立地条件に関する要素も大きく影響してくるものと思われ、津波によるタンクの移動は、複雑な要素が複合的に作用しあって発生するものと考えられます。

A工場では3基のタンクが津波により移動する結果となりましたが、タンク元弁は、津波

表3 タンクの浮力と自重の比較

タンク	直径 (m)	許可容 量(kℓ)	地震時		判定	浮力※ ² (KN)	移動した タンク
			液位 (m)	総重量※ ¹ (KN)			
A	13.56	980	0.866	1,802.73	<	4,766.98	○
B	13.56	980	1.082	2,299.26	<	4,766.98	○
C	13.56	980	0.897	1,850.76	<	4,766.98	○
D	13.56	980	6.615	10,727.37	>	4,766.98	
E	15.536	1,500	1.713	4,187.66	<	6,257.53	
F	13.56	980	2.284	4,164.53	<	4,766.98	
G	13.56	980	6.586	10,639.12	>	4,766.98	
H	13.56	980	6.533	10,581.70	>	4,766.98	
I	13.56	980	0.891	1,841.46	<	4,766.98	

※1：総重量＝タンク自重＋液重量

※2：浸水深さを3.3m、海水の比重を1.02として計算

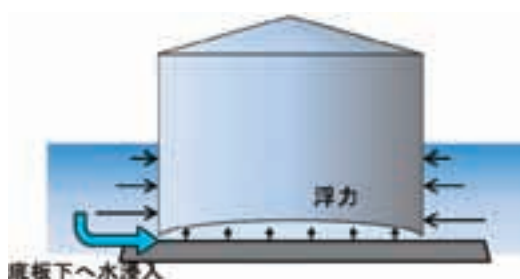


図9

が来る前に閉められたことから、海上へ油が流出することはありませんでした。

(2) タンク基礎・地盤の洗掘

A工場では、図10に示す3基のタンクで、基礎や地盤の洗掘が確認されました。3基のタンクは、津波により移動したタンクAとBの2基が含まれ、全て許可容量980kℓの準特定タンクです。また、3基のタンクは、杭基礎の形式を採用しています。いずれのタンクも、津波が来たとされる方向の周辺地盤が洗掘されていました。

図11は、タンクAの周辺地盤の状況を示すものです。周辺地盤は、津波により一部流出し、基礎スラブ下にも、大きな空隙が生じています。また、杭も一部露出していることがわかります。

図12（事業所提供）は、津波が来た直後に撮影されたタンクJの周辺地盤の状況を示すもの



図10



図11

です。この場所を、約半年後の9月に、違う角度から撮影したものが、図13になります。



図12（事業所提供）



図13



図14

図13の周辺地盤は、雨風等による地盤洗掘の拡大を防止する目的で、碎石による埋戻しが行われていますが、杭基礎のスラブ下は奥深くまで洗掘され、杭も一部露出していることがわかります。こうしたスラブ下に空隙が生じた箇所は、エアモルタルによりスラブ下を充填する対

策が実施されました。

なお、3基のタンクの周辺地盤や基礎スラブ下は、津波により大きく洗掘される結果となりましたが、基礎の不等沈下量は、震災前と変わらない状態であることが確認されており、杭や基礎スラブに、大きな影響はなかったものと考えられています。

図14に示すタンクBの基礎では、周辺地盤の洗掘の他、底部板裏面のアスファルトモルタルが一部流出する事象も確認されました。

(3) 防油堤の破損

A工場では、図15に示す延長約40mの範囲で、防油堤の破損が発生しました。破損した箇所は、海側に面し、津波の影響を一番受けやすい箇所であったことが想像できます。津波直後に撮影された図16（事業所提供）をみると、防油堤の基礎と周辺地盤は大きく洗掘され、防油堤自体も大きく沈下していることがわかります。なお、防油堤は、直ちに復旧作業に着手され、防油堤としての機能回復が図られました（図17）。

(4) 保温材の破損と側板の変形

A工場が所有するタンクは全て、側板に保温材が設置されています。この全てのタンクの保温材が、津波による損傷を受けました（図18（事業所提供））。中には、側板に変形が生じたタンクも、2基確認されました（図19）。

側板に変形が生じた2基のタンクは、表3のタンクBとタンクEに該当します。いずれのタンクも、津波が来たとされる方向に、側板の変形が生じました。

当該タンクヤード内には、底板から約3.3mの高さまで津波が来たとされていることから、図20のタンクEをみると、側板2段目上端を約30cm超える高さまで、津波の影響を受けたこととなります。図21に示すタンクEの側板変形状況をみても、側板2段目の高さまで津波が来たと推測することができます。



図15

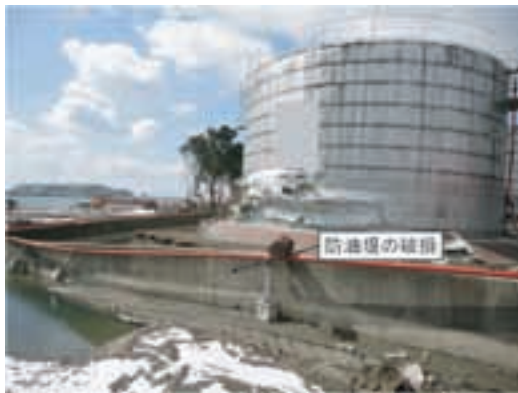


図16（事業所提供）



図17

図20には、タンク E の地震当時の液位と津波高さとの関係も示していますが、当時の液位 1.7m を大きく超える高さまで津波が来たこととなり、津波波力の外圧を受ける側板は、変形



図18（事業所提供）



図19

しやすい状況であったことがわかります。

(5) その他

A 工場の敷地内には、津波により漂流してきた材木等が多く堆積しました（図22（事業所提供））。前項で、保温材の損傷や側板の変形した状況を紹介しましたが、こうした津波とともに押し寄せた漂流物の一部が、側板等に損傷を与えた一つの要因ではないかと、推測することもできます。

図23は、タンクヤードから約200m 陸側にある自家発電設備の建屋の状況を示すものです。この場所でも津波の大きな影響を受けたことがわかり、建屋の外壁は高い位置まで破損し、また周辺地盤も大きく洗掘されています。

3.2 川崎地区

川崎地区は、屋外貯蔵タンクを有する事業所が数多く設置されており、準特定タンクと特定

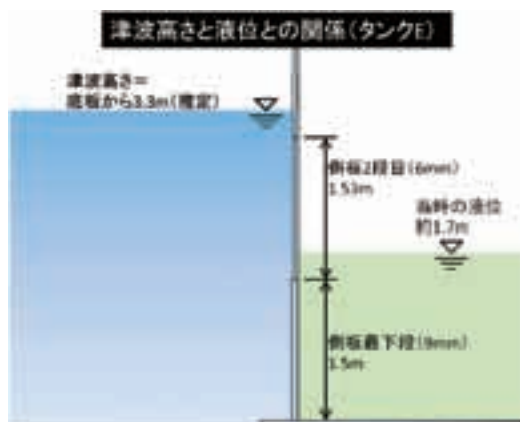


図20



図21

タンクを合計した基数も、国内で最も多い地区であることが、総務省消防庁の統計で示されています¹⁾。川崎地区では、合計5つの事業所の被害調査を実施しました。

川崎地区では、浮き屋根が沈没した事例が1件報告されており、その他、アルミ製のハニカムデッキ型内部浮き蓋が破損した事例も報告され、長周期地震動による被害が多く確認されました。

この章では、川崎地区で発生した危険物施設の被害について、形態別に報告することとします。



図22（事業所提供）



図23

3. 2. 1 長周期地震動による被害

(1) 浮き屋根の沈没

川崎地区では、浮き屋根が沈没する被害が1件発生しました。当該タンクは、B-1製油所が所有する直径38.74m、許可容量19,365kl（許可液面高さ16.429m）のシングルデッキ型浮き屋根タンクです。このタンクの容量は、2万kl未満ですが、告示第2条の2に規定する側板最上端までの空間高さ（Hc）が2.0m以上となることから、この浮き屋根は、浮き屋根新基準（平成17年総務省令第3号等に規定された浮き屋根の基準）に適合させることが必要なタンクです。しかしながら、浮き屋根新基準の経過措置期間中であることから、地震当時、このタンクの浮き屋根は、まだ新基準には適合していませんでした。

地震発生当時、このタンクには、9,647kl（液位8.18m）と、ほぼ半分程度の重油が貯蔵されていました。地震発生の翌日（3月12日）に、浮き屋根の状況を確認したところ、浮き屋根デッキ上に滞油が確認されましたが、ポンツーンは沈没することなく、まだ完全に浮いた状態を保っていました。しかしながら、浮き屋根の沈下は徐々に進行し、翌々日（3月14日）の午前7時頃から、浮き屋根の沈下は顕著に現れ、完全に沈没することとなりました。

平成15年十勝沖地震の際、苫小牧地区に設置されたタンクの浮き屋根も2～3日経ってから沈没しはじめたことが報告されています²⁾が、今回の浮き屋根も、十勝沖地震時と同様の経過を辿る結果となりました。

図24～図26は、地震発生から2ヶ月以上たった5月下旬に調査した時点での浮き屋根の状況



図24



図25

を示すものです。浮き屋根は大きく変形し、また、直径8インチのゲージポールも地震当時の液位と思われる箇所で、タンク内側に引っ張られるように変形していることがわかります。

図26は、側板マンホールから、タンク内部の浮き屋根ポンツーンの状況を撮影したものです。タンク内に入り、詳細調査を実施することはできませんでしたが、側板マンホールから見える範囲だけでも、図27に示すポンツーン外リム板と下板との溶接線部分が、破断・開口し、損傷していることがわかりました。

当該タンクに実際に発生したスロッシング高さは、側板に残る油の痕跡から、約1.0～1.5mであったと推測されています。地震当時の液位から算出される消防法令上の計算スロッシング高さは約2.72mとなり、実際に発生したスロッシング高さは、計算上のものよりは、小さかったことがわかります。また、当該事業所の周辺



図26

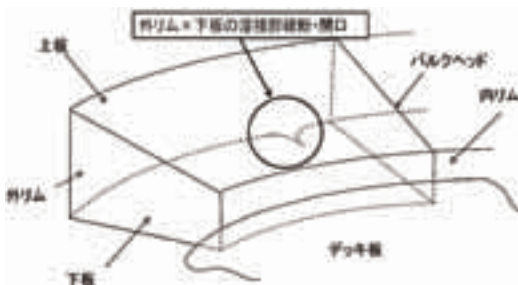


図27

表4 浮き屋根強度評価結果

部位	一次モード	二次モード		合成応力 $\sqrt{(\sigma_{b1})^2 + (\sigma_{b2} + \sigma_{c2})^2}$ (N/mm ²)	許容応力 (N/mm ²)
	円周方向面外 曲げ応力 σ_{b1} (N/mm ²)	水平面内曲げ 応力 σ_{b2} (N/mm ²)	円周方向圧縮 応力 σ_{c2} (N/mm ²)		
外リム	384.11	7.92	67.11	391.37	220.64
内リム	282.65	8.22	67.11	292.51	220.64

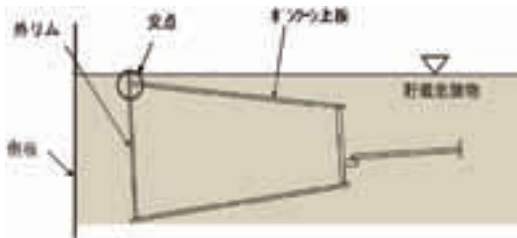


図28

で観測された地震動からも、告示第4条の20第2項第3号に規定される液面揺動の設計水平震度に対応する速度応答スペクトルに満たなかったことも報告されています³⁾。

次に、当該タンクの浮き屋根について、消防法令上規定された浮き屋根評価手法に従い、強度と浮力の評価を実施してみることとしました。

前述したように、実際に発生したスロッシング高さは消防法令上想定するものよりも小さかったと思われますが、現行消防法令の浮き屋根評価手法に従って強度評価をしてみると、表4に示すとおり、合成応力は許容応力を大きく超える結果となりました。さらに、実際に損傷が確認できた外リム板と下板との交点部分に発生する応力に着目してみると、この部位に発生する応力は許容応力を大きく超える結果になることもわかりました。

浮き屋根新基準には、ポンツーン四隅のすみ肉溶接サイズも規定されていますが、図面上で確認する限り、当該タンクのすみ肉溶接サイズは、消防法令上規定された溶接サイズよりも小さかったことが確認されており、この浮き屋根は、浮き屋根耐震基準で要求される強度を十分

満たしていなかったものと考えられます。

次に、浮力に着目してみると、全部で13室のポンツーンを有する当該タンクの浮き屋根は、消防法令上想定する室数（当該タンクは4室）が破損した場合、残りの9室が有する浮力は浮き屋根重量を下回ることとなり、浮き屋根は沈没する結果になることがわかりました。さらに、ポンツーン1室のみが破損した場合の状態を確認してみると、図28に示すように、危険物の最大喫水線は、ポンツーン外リム板と上板との交点を約5 cm 超える結果となり、1室だけ破損したと仮定しても、この浮き屋根は十分な浮力を有していなかったことがわかりました。

(2) 浮き屋根ポンツーン内滞油

川崎地区では、5基のシングルデッキ型浮き屋根式タンクで、ポンツーン内の滞油が確認されました。このうちの3基のタンクは、浮き屋根新基準に適合させることが必要なタンクです。しかしながら、浮き屋根新基準の経過措置期間中であることから、この3基のタンクは、地震発生当時、まだ浮き屋根新基準には適合していない状態でした。残りの2基は、浮き屋根新基準に適合させる必要のないタンクですが、この2基のうち、D油槽所が所有する1基のタンクについて、被災状況を調査しましたので、詳細に説明することとします。

当該タンクは、直径30.028m、許可容量9,624klのシングルデッキ型浮き屋根タンクです。地震当時は、7,800kl（液位11.17m）の油が貯蔵されていました。14室あるポンツーンの

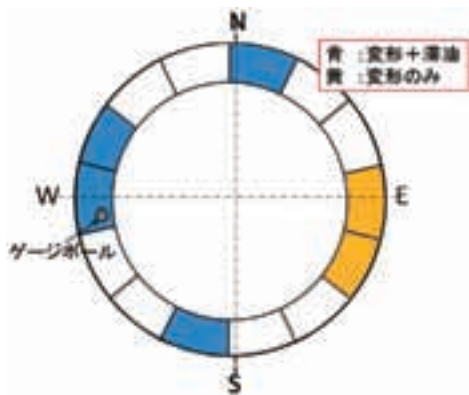


図29

うち、図29に示す6室にポンツーンの変形がみられ、そのうちの青色で示す4室において、滞油が確認されました。

当該事業所は自ら、事業所近傍で得られた地震観測データに基づき、スロッシング応答解析による当該タンクの浮き屋根損傷メカニズムの分析・推定を行っていました。その分析によると、スロッシングの主揺動方向は、概ね東西方向であったことが報告されており、変形や滞油がみられたポンツーンは、スロッシング主揺動方向とそれに直交する位置で発生していることがわかりました。

滞油が認められたポンツーン内の状況を図30と図31に示しますが、ポンツーン下板は下側に凸の状態に変形し、外リム板と下板との溶接線部分で破断・開口していることがわかりました。このポンツーン損傷形態は、本誌141号で紹介した新潟地区で発生したポンツーンの損傷形態に類似していることがわかります。

事業所が行った分析によると、事業所近傍で得られた地震観測データから算出されるスロッシング高さは約1.32mになるとされていますが、ゲージポールに残るスロッシングの痕跡から、実際には約2.0mのスロッシングが発生したものと推測されていました。この分析では、実際に発生したとされる2.0mのスロッシング高さを採用し、当該浮き屋根に発生する応力評



図30



図31

価が実施されていました。その結果、このタンクに2.0mのスロッシングが発生した場合には、ポンツーン外リム下端に発生する応力は許容応力を超えることとなり、大きなスロッシングが発生したため、今回の損傷が生じたものと結論付けられていました。

(3) 内部浮き蓋ポンツーン内滞油

川崎地区では、D油槽所が所有する1基のインナーフロートタンクにおいて、内部浮き蓋ポンツーン内の滞油が確認されました。このタンクは、鋼製シングルデッキ型内部浮き蓋を有し、直径40.682m、許可容量18,040klのキシレンを貯蔵するタンクです。

この内部浮き蓋の損傷状態は、図32に示すとおりであり、全20室を有するポンツーンのうち、青色で示す9室において滞油が確認されまし

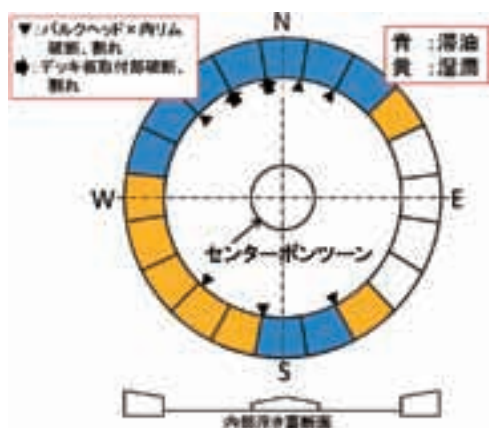


図32



図33

た。黄色で示す7室は、タンク開放時、ポンツーン内が湿潤状態であったものの、滞油はなかったとされるポンツーンです。また、デッキ板上にも滞油が確認されました。

当該内部浮き蓋のポンツーンには、2つの損傷形態が確認されています。まず、図33と図34に示すように、ポンツーンのバルクヘッドと内リム板との溶接部が破断し、内リム板にも割れが発生した損傷形態です。このような箇所は、図32の▼印で示す、6箇所において確認されました。次に、図35と図36に示すように、デッキ板が内リム板に取り付けられている溶接部で破断した損傷形態です。このような箇所は、図32の▲印で示す2箇所において確認されました。

このように、当該内部浮き蓋は多くのポンツーンで滞油し、デッキ板上にも滞油することとなりましたが、幸い、内部浮き蓋中心にあるセンターポンツーンの浮力が、補助的な働きを



図34

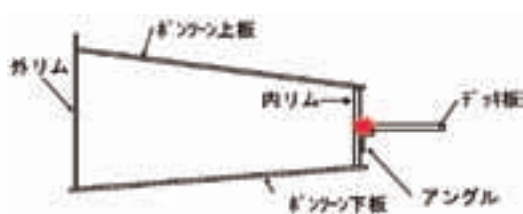


図35



図36

したことにより、内部浮き蓋は沈没しなかったのではないかと、考えられています。

(4) ハニカムデッキ型内部浮き蓋の破損

川崎地区では、2基のタンクで、アルミ製ハニカムデッキ型内部浮き蓋の破損が確認されました。ハニカムデッキ型内部浮き蓋は、六角形をした蜂の巣構造のハニカムコアを、厚さ1.27mmのデッキスキンで上下から挟み込み、3.0m×1.5mの大きさに一つのデッキ板を構

成しています(図37)。その個々に独立したデッキ板同士をボルトで接合し、さらにその外周にシールゴムを配して、内部浮き蓋は作成されています(図38)。

被害がみられた2基のタンクは、E化学会社が所有するものであり、そのうちの1基のタンクについて、調査を実施しましたので、その状況を詳細に報告することとします。

このタンクは、直径32.93m、許可容量9,950klのタンクで、地震当時は約4,500kl(液位5.3m)の軽油が貯蔵されていました。この地震当時の液位から算出される計算上のスロッシング高さは、2.26mとなりますが、実際に発生したスロッシング高さは、特定することはできませんでした。ただし、当該タンクの側板には、図39に示すように、浮き蓋外周シールゴムが付けたと思われるスロッシングの痕跡がみられました。この痕跡は、大きくカーブを描き、また、あらゆる方向に揺動したことを示していました。

図40に、内部浮き蓋の損傷状況を示します。内部浮き蓋は、209枚のデッキ板で構成され、そのうちの38枚のデッキ板の接合部に損傷がみられました。接合部分の損傷は、直径をほぼ三等分した位置で発生しており、デッキ板の長手方



図37 ハニカムデッキ型内部浮き蓋概要図

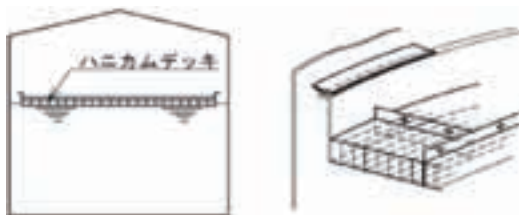


図38

向の継ぎ手部で損傷していました。図40の赤線で示した箇所は、デッキ板接合部が連続して損傷したため、図41のように、デッキ板が沈み込んだ箇所を示すものです。また、青線の部分は、デッキ板の沈み込みはなかったものの、図42のように、ボルト接合部の破損がみられた箇所を示すものです。

個々のデッキ板は剛性が高いため、デッキ板自体で折れ曲がるような被害はみられませんでした。ボルト接合している部分で損傷が多く確認されました。ただし、ボルト自体の破断はみられませんでした。

総務省消防庁の調べ(平成19年10月1日現在)によると、ハニカムデッキ型内部浮き蓋のタンクは全国に4基設置されていますが、これまで地震によるハニカムデッキ型内部浮き蓋の被害は報告されていません⁴⁾。こうしたことを考えると、今回の被害は、地震によって確認されたハニカムデッキ型内部浮き蓋の最初の被害事例と思われます。

(5) 側板頂部及び固定屋根の変形

川崎地区では、長周期地震動によるスロッシングの影響で、固定屋根式タンクの側板頂部と屋根が変形する被害が1件発生しました(図43)。このタンクは、C製油所が所有する直径29.05m、許可容量9,921klのコーンルーフタンクで、地震発生当時はほぼ満液状態に近い



図39

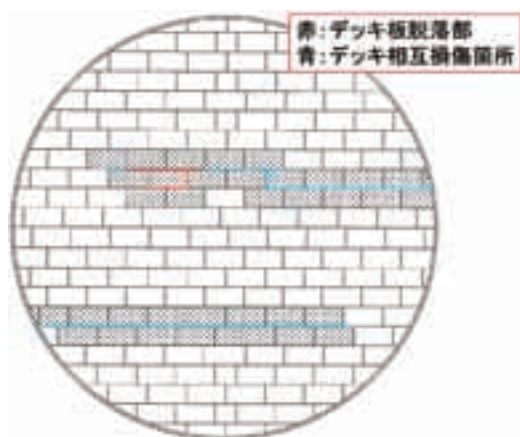


図40

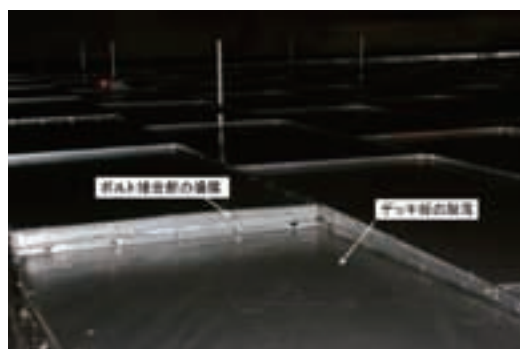


図41



図42

9,543klの重油が貯蔵されていました。

スロッシングにより側板頂部等が変形するイメージを図44に示しますが、長周期地震動により揺動した内容物が、側板頂部と固定屋根に衝突すると、その衝撃を受けた当該箇所は、円形状に変形しようとしています。そうした力が作用し



図43

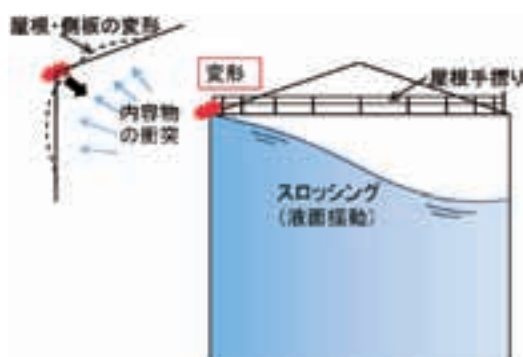


図44

たトップアングル部は、図43と図44に示すようにタンク中心側に変形することとなります。

このタンクは、地震時の液位が14.667mであり、タンク高さが16.5mであることを考えると、1.8m以上のスロッシングが発生したことが推測できます。当時の液位から算出される計算上のスロッシング高さは1.42mであることから、実際に発生したスロッシング高さは、計算上のものよりは大きかったことがわかります。

またこのタンクは、重油がタンク外へ飛散する二次的被害も発生しました（図45）。

図45の油が飛散した直上には、図46で示す固定泡消火設備のエアフォームチャンバーが設置されていました。エアフォームチャンバー近傍の側板頂部と屋根手摺りが変形していることから、スロッシングの主揺動方向は、これらの方向に発生したものと推測することができます。



図45

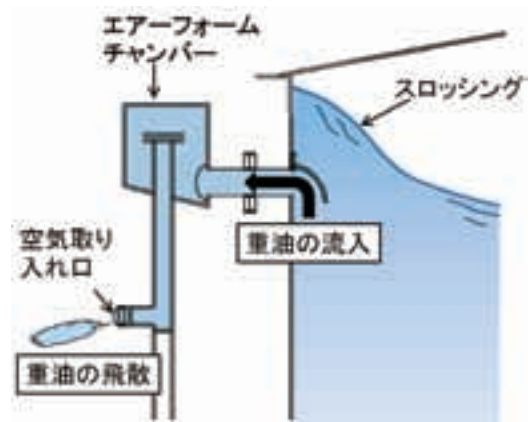


図47



図46

重油がタンク外へ飛散した理由は、図47に示すように、大きなスロッシングが発生したことから、エアフォームチャンバー内に重油が逆流し、その空気取り入れ口から、重油が吹き出したためと考えられています。

今回、このタンクはスロッシングの影響で、側板頂部等が変形することとなりましたが、東日本大震災における危険物施設の被害の中で、「長周期地震動」により損傷した固定屋根式タンクは、このタンク1基のみとなっています。

(6) その他

これまで川崎地区で発生した長周期地震動による浮き屋根等の被害を報告しましたが、川崎地区で確認されたその他の被害を紹介します。

長周期地震動によるスロッシングの影響でゲージポール本体が変形する事象は、これまで多く確認されていますが、川崎地区では、図48

と図49に示すように、ゲージポール本体が約45度回転した事象が確認されました。

この事象が発生したのは、浮き屋根の揺動に伴い、ゲージポールに回転する力が働いたためと思われます。図49に示すゲージポールの取付踊り場は、腐食が進行していました。なお、このタンクに、浮き屋根上への滞油やポンツーンの破損はありませんでした。

その他、川崎地区においては、浮き屋根の外周シールゴムの破損や図50に示す浮き屋根上への内容物の溢流等、長周期地震動による被害が多く確認されました。

3. 3 市原地区

市原地区は、川崎地区同様、東京湾岸に位置する日本を代表するコンビナート地区です。

被害事例についても川崎地区同様、長周期地震動による浮き屋根等の損傷が報告されています。その被害状況を、形態別に報告することとします。

3. 3. 1 長周期地震動による被害

(1) 浮き屋根ポンツーン内滞油

市原地区では、長周期地震動によるスロッシングの影響で、浮き屋根が損傷し、ポンツーン内に滞油したタンクが4基確認されました。このうちの3基は、H製油所が所有するシングルデッキ型の浮き屋根式タンクで、残りの1基は

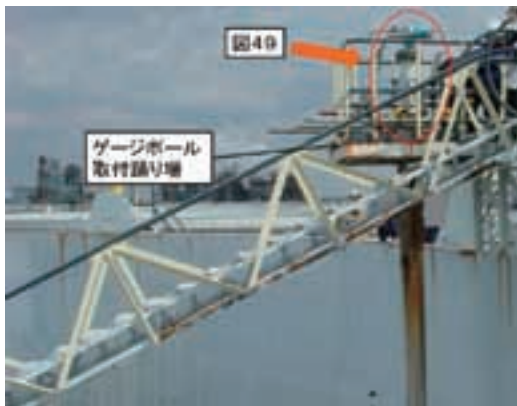


図48



図50



図49

F 火力発電所が所有するダブルデッキ型の浮き屋根式タンクです。まず、H 製油所が所有するシングルデッキ型浮き屋根式タンクの1基について、現地調査を実施しましたので、その事例について説明することとします。

このタンクは、直径67.37m、許可容量51,418klの原油タンクで、地震発生当時は、28,800kl（液位9.48m）の油が貯蔵されていました。また、このタンクは、浮き屋根新基準に適合させることが必要なタンクですが、経過措置期間中であることから、浮き屋根新基準にはまだ適合していない状態でした。

このタンクの浮き屋根は、図51に示すとおり、全部で32室のポンツーンを有しており、そのうちの7室において滞油が確認されました。滞油が確認されたポンツーン7室のうち、1室だけ

はポンツーンの破断・開口箇所を特定することができませんでしたが、残りの6室の全ては図52に示すような、破断・開口が発生していました。ポンツーンの外リム板と下板との溶接部分は大きく破断・開口し、ポンツーンの母材までも大きく引き裂かれた状態で破損していました。また、図53に示すように、ポンツーン本体には、大きな変形も生じていました。

このタンクに発生したスロッシング高さは、特定することはできませんでしたが、当時の液位から算出される計算スロッシング高さは、約1.54m になることがわかりました。

この1.54m のスロッシングが発生した場合に、当該タンクの浮き屋根は、十分な強度を有しているかどうか、消防法令上の浮き屋根評価式に従い、強度評価を実施してみることとしました。その結果、当該浮き屋根に発生する応力は、許容応力以下となり、計算上からは、現状の状態でも、スロッシングに十分耐え得る構造であったことがわかりました。しかしながら、図52に示した破断・開口した箇所の近傍は、部分的に、残り2 mm 程度の板厚しかなく、こうした局所的な板厚不足が、今回のポンツーン破損に至った一つの原因ではないかと推測しています。

また、浮力に着目すると、このタンクの浮き屋根は、消防法令上で想定する破損室数（当該タンクは4室）を大きく上回り、7室も破損す

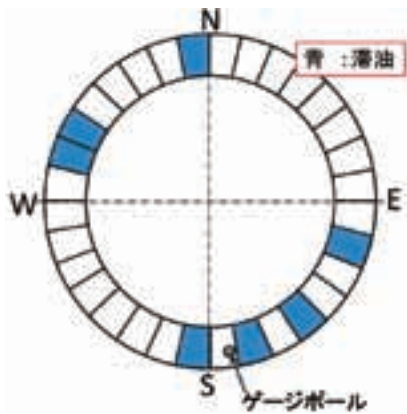


図51

ることとなりましたが、浮き屋根は沈没することなく、また大きな傾斜もみられませんでした。浮力計算を実施してみると、このタンクの浮き屋根は、7室破損しても残りの浮き室が有する浮力は屋根総重量を上回る結果となり、十分な浮力を有していたことがわかりました。また、図51に示すように、ほぼ相對した位置でポンツーンが破損したことが、大きな傾斜に至らなかった要因ではないかと考えています。

次に、F 火力発電所で発生したダブルデッキ型浮き屋根のポンツーン内滞油を説明することとします。

このタンクは、直径61.0m、許可容量45,900klの原油タンクです。地震発生当時は、40,768klの油を貯蔵していました。図54は、当該タンクの浮き室の配置を示したものであり、屋根全体が浮き室となっています。

図55に示すデッキ下板相互溶接線が破断したことにより、図54の網掛けした2室に滞油が確認されました。

当該タンクの地震当時の液位から算出されるスロッシング高さは、約3.75mとなりますが、ゲージポールに残るスロッシングの痕跡は約1.8mとされており、実際に発生したスロッシング高さは、消防法令上想定するものよりも小さかったものと思われます。また、当該事業所がある市原地区の特防区域で観測された地震観

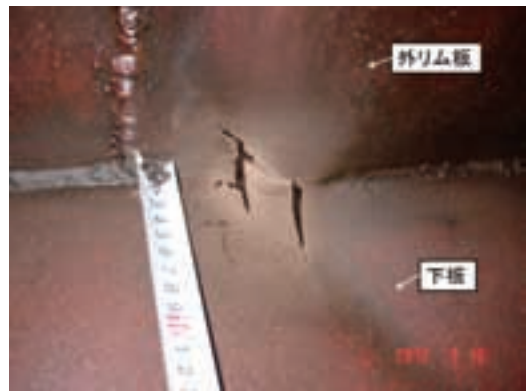


図52

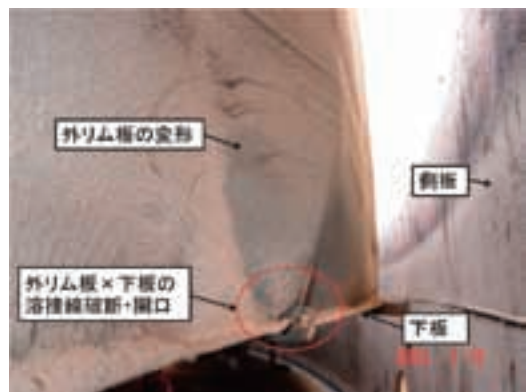


図53

測データは、告示第4条の20第2項第3号に定められている液面揺動の設計水平震度に相当する速度応答スペクトルに対しても小さかったことも報告されています³⁾。

(2) 内部浮き蓋の破損及びデッキ板上の滞油

市原地区では、G 工場が所有する1基のインナーフロートタンクにおいて、内部浮き蓋が破損し、デッキ板上に滞油する事象が発生しました。なお、この被害事例については、本誌140号に、地元消防局による事故覚知後の対応から被害調査に至るまでの詳細な報告が掲載されています。

このタンクは、直径19.36m、許可容量4,906klのシクロヘキサンを貯蔵するインナーフロートタンクです。このタンクの内部浮き蓋は、図57に示すような鋼製ポンツーン型で、通常のシングルデッキ型浮き屋根と同様の構造をしていま

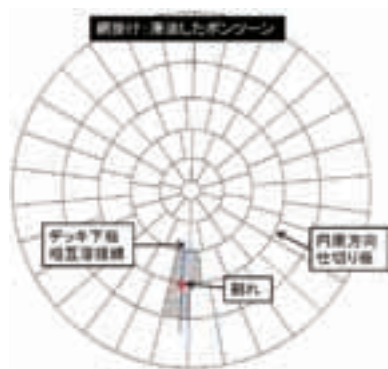


図54

す。また、このタンクの内部には、タンク内の異常を覚知することを目的として、ガス検知用配管や窒素ガス配管を内部浮き蓋上に導入するための配管架台（ローリングサポート）が、設置されています。ローリングサポートは、浮き屋根式タンクでみられるローリングラダーと同様、貯蔵液の出し入れに伴い、内部浮き蓋上に設置されたレール上をローリングサポートの車輪が走行する構造となっています。

このタンクの異常が覚知されたのは、3月の地震発生から4ヶ月以上経った7月中旬です。その間、このタンクは通常運転を続け、貯蔵液の出し入れも数回行われていました。当該タンクの内部浮き蓋は、油の払い出しにより、覚知する5日前には、底板から約2.68mの高さの低位置まで降下していました。この日から、当該タンクは油の受け入れを開始し、5日間当該作業を継続していました。液位が約12.2m（容量3,517kℓ）となった5日後の夕方に、ガス検知器が発報し、浮き蓋上への滞油が覚知されることとなりました。

当該タンクを開封してみると、図58と図59に示すように、ローリングサポートは、レール上から脱離し、デッキポストを押し倒している状況を確認することができました。デッキポスト取付部には、開口が生じ、その開口部から内部浮き蓋上に油が溢流したことが判明しました。

当該事業所がとりまとめた調査報告書による

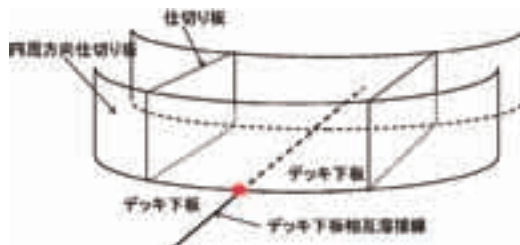


図55

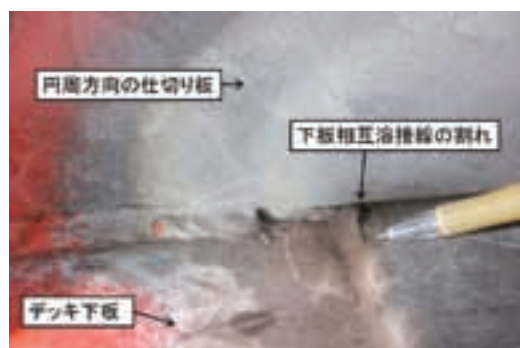


図56

と、隣接する製油所に設置された地震計から、3月11日本震時の地震動記録が得られており、この地震動記録から算出されるスロッシング高さは、東西方向で1.55m、南北方向で1.17mになったことが記されていました。また、この報告書では、南側に位置するゲージポールに残るスロッシングの痕跡から、実際に発生したスロッシング高さは約1.08mであったことが報告されており、地震動記録から得られたスロッシング高さと概

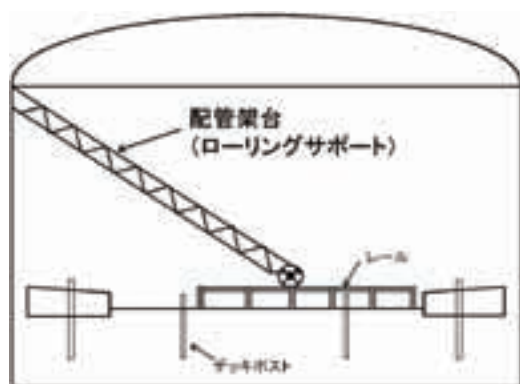


図57



図58



図59

ね一致する結果であったことが記されていました。なお、地震発生時の液位8.041m（容量2,393kl）から算出される消防法令上の計算スロッシング高さは、1.14m となり、この値も概ね一致する結果であることがわかりました。

当該事業所の調査報告書を参考に、ローリングサポートの変形・損傷に至るまでのシナリオを説明すると、図60のとおりとなります。

通常は、内部浮き蓋が上下移動すると、ローリングサポートの車輪はレール上をスムーズに前後移動します（図60、①）。しかしながら、3月11日に発生した地震により内部浮き蓋は大きく揺動し、ローリングサポートの車輪はレール上から脱輪することとなります（②）。その後、油の受け払いを数回行っていますが、油の受け

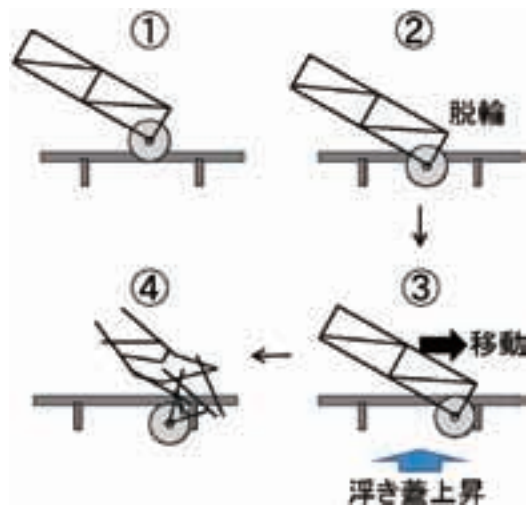


図60



図61

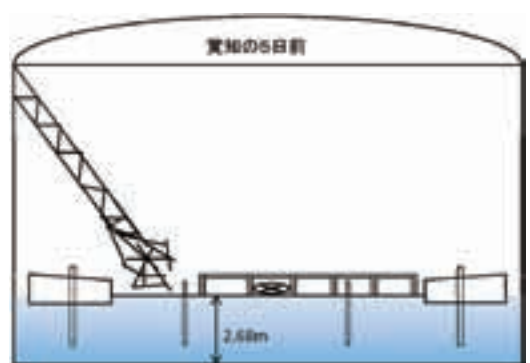


図62

入れに伴う内部浮き蓋の上昇時、脱輪したローリングサポートの一部は、レール横梁等に引っ掛かることとなります（③）。レール上を移動できなくなったローリングサポートは、継続し

て行われた油の受け入れに伴う内部浮き蓋の上昇によって、ローリングサポートの先端は、次々に変形していくこととなります（④）。このように、次々に損傷していったローリングサポートの先端は、**図61**に示すように、糸くずを丸めたような状態にまで、変形することとなります。

こうして先端が短くなったローリングサポートは、内部浮き蓋が低位置となった覚知の5日前には、**図58**と**図62**に示すように、レール上から完全に脱落することとなります。内部浮き蓋上に脱落したローリングサポートは、その後開始した油の受け入れとともに、上昇していく内部浮き蓋上を移動し、最終的には、デッキポストを折損させることとなります。このようにして、デッキポストの取付部に破断・開口が生じ、タンク内部に設置してあったガス検知器によりデッキ板上への滞油が覚知されることとなりました。

今回、このタンクは、運転中の液面計記録も取られていましたが、内部浮き蓋の異常を早期に覚知することができませんでした。また、インナーフロートタンクは、タンク内部の状態を確認しづらいことも、覚知までに時間を要した一つの原因と考えることができます。

総務省消防庁の報告書⁴⁾によると、ガス検知設備を設置することは、インナーフロートタンク内部の異常を覚知するうえで有効な方法の一つであることが示されています。また、タンク内部が可燃性蒸気で充満した場合の対応として、不活性ガスでタンク内酸素濃度の低下させることも、有効な手段であることが示されています。

今回、このタンクはローリングサポートが損傷し、デッキ板上に滞油することとなりましたが、ガス検知設備があったことから、デッキ板上への滞油後は早期にタンク内部の異常を覚知することができました。また、窒素封入設備もあったことから、タンク内部の可燃性蒸気の滞留に対する設備として、迅速、かつ、適切に当該設備を利用した対応をとることができました。

4 被害のまとめ

今回紹介した「石巻地区」、「川崎地区」及び「市原地区」の被害を形態別にとりまとめると、**表5**、**表6**及び**表7**のとおりとなります。

表5の石巻地区については、準特定タンクと特定タンクを合計した基数となります。また、「側板の変形」については、保温材を撤去してからの詳細調査となるタンクが数基ありますが、現時点で明確に判明している基数のみを計上しました。

表6の川崎地区と**表7**の市原地区の被害基数については、特定タンクの基数を表記しています。この二地区の「浮き屋根」被害については、別途、浮き屋根耐震基準別に集計し、**表8**に「川崎地区」を、**表9**に「市原地区」をそれぞれ表記することとしました。

5 おわりに

今回の東北地方太平洋沖地震では、広く東日本一帯を強い地震動が襲うと共に、特に東北地方の太平洋沿岸部では、津波による甚大な被害が発生しました。東日本大震災における危険物施設の被害に着目すると、その被害は、津波や地震動といった被害発生の要因に、地域による差がみられたのが大きな特徴と思われます。

本稿で紹介した三地区についても、発生した被害は、地区ごとに特徴がみられました。東北地方太平洋沖に位置する石巻地区では、津波による甚大な被害が発生しました。また、震源域からは遠く離れた東京湾岸では、長周期地震動による浮き屋根等の被害が多く発生しました。改めて、これまで紹介してきた全ての地域の危険物施設被害を要因別にとりまとめると、**図63**のように区分することができます。

今回紹介した地域でも、地元消防本部や事業所の方々による事前調査や資料等のとりまとめが行われていたことにより、限られた時間の中で、計画的な調査を実施することができました。石巻地区のA工場では、津波による大きな被

表 5 石巻地区における被害を受けたタンク基数

被害の要因		被害の形態	基数（準特定タンク以上）
津波	タンク	移動	3
		側板の変形	2
		保温材の損傷	14
	基礎	洗掘	1
	地盤	洗掘	3

表 6 川崎地区における被害を受けたタンク基数

被害の要因		被害の形態	基数（特定タンク）
長周期	スロッシング	浮き屋根沈没	1
		浮き屋根傾斜	2
		ボンツーン内滞油	5
		デッキ板上へ危険物溢流	4
		ゲージボール、回転止め等の変形 (付随する設備の損傷も含む)	2
		ルーフトレン配管一部破損	1
		外周シールゴムの破損	2
		内部浮き蓋	1
		ハニカムデッキ型内部浮き蓋の損傷	2
		デッキ板上へ危険物溢流	3
		固定屋根	1
		タンク外へ危険物飛散	1

表 7 市原地区における被害を受けたタンク基数

被害の要因			被害の形態	基数（特定タンク）
長周期	スロッシング	浮き屋根	ボンツーン内滞油	4
			デッキ板上へ危険物溢流	3
			ゲージボール、回転止め等の変形	3
		内部浮き蓋	浮き蓋上へ危険物溢流	1
			ゲージボールの変形	1
			配管架台（ローリングサポート）の破損	1

表 8 浮き屋根耐震基準別の被害を受けたタンク基数（川崎地区）

	被害の形態	浮き屋根新基準対象タンク		浮き屋根新基準対象外タンク	計
		新基準適合済み	未適合		
浮き屋根	浮き屋根沈没	0	1	0	1
	浮き屋根傾斜	0	0	2	2
	ボンツーン内滞油	0	3	2	5
	デッキ板上へ危険物溢流	0	3	1	4
	ゲージボール、回転止め等の変形（付随する設備の損傷も含む）	0	1	1	2
	ルーフトレン配管一部破損	0	1	0	1
	外周シールゴムの破損	0	0	2	2

表9 浮き屋根耐震基準別の被害を受けたタンク基数（市原地区）

	被害の形態	浮き屋根新基準対象タンク		浮き屋根新基準対象外タンク	計
		新基準適合済み	未適合		
浮き屋根	ボンツーン内滞油	0	2	2	4
	デッキ板上へ危険物溢流	0	2	1	3
	ゲージボール、回転止め等の変形	0	2	1	3



図63

害が発生し、現場復旧に全力を注がれている中、業務の一環で訪れたにも関わらず、現地調査の実施を快く引き受けていただきました。また、川崎地区と市原地区では、逐次情報提供していただき、計画的に調査を実施することができました。この場をお借りし、御礼申し上げます。

本誌139号の「仙台地区」から始めた東日本大震災の詳細報告の内容は、あくまで、総務省消防庁及び消防研究センターを通じて得られた被害情報から現地調査を実施し、その結果に基づいて報告したものです。当然のことながら、東日本の市街地や特に太平洋側の沿岸部では、危険物施設に限らず、大きな被害が発生しています。本誌で紹介した東日本大震災の被害報告は、危険物施設に限られたものであり、その中でも特に、屋外タンク貯蔵所に関連する設備等を対象として、その結果を報告してきたことを改めてお断りしておきます。

昨年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地

震から、早一年が過ぎましたが、被災地の完全復興には、もうしばらく時間がかかると思われ、現地はまだまだ復興に向け、地域一丸となった取り組みが行われているところです。改めて、東日本大震災で被災された皆様には、心からお見舞い申し上げますとともに、被災地の一日も早い復興をお祈り申し上げます。

参考文献

- 1) 消防庁：平成22年度 危険物規制事務統計表
- 2) 危険物保安技術協会：平成15年十勝沖地震 危険物施設の被害記録（平成16年12月）
- 3) 総務省消防庁：「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」第2回、資料2－7
- 4) 総務省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（平成23年3月）