

資 料 編

資料 1	危険物施設等における事故の発生状況	1
資料 2	災害影響の算定手法	9
資料 3	対象地域の気象条件	26
資料 4	千葉県地震被害想定調査による液状化の予測手法	32
資料 5	計測震度の算出方法（気象庁）	36
資料 6	長柱座屈防止対策について	37
資料 7	応答スペクトルの概念	39
資料 8	石油タンクのスロッシングによる溢流量の算定手法	40
資料 9	想定地震等の発生確率	43
資料 10	想定東海地震によるスロッシングの推定	45
資料 11	東北地方太平洋沖地震による速度応答スペクトル	48
資料 12	危険物タンクの津波被害シミュレーションツール	52
資料 13	想定東海・東南海・南海地震の海岸における津波高	53
資料 14	石油コンビナート等特別防災区域に係る防災体制等の調査結果	55
資料 15	海上流出油の防除資機材	73
資料 16	定量的評価が困難な毒性物質の危険性	74

資料1 危険物施設等における事故の発生状況

1. 平常時の事故発生状況

表 1.1 危険物施設における事故発生状況(平成 16(2004)～平成 25(2013)年)

年	事故種別等	製造所	貯蔵所							取扱所			
			屋内貯蔵所	屋外タンク貯蔵所	屋内タンク貯蔵所	地下タンク貯蔵所	簡易タンク貯蔵所	移動タンク貯蔵所	屋外貯蔵所	給油取扱所	移送取扱所	一般取扱所	
平成16 (2004)	火災	件数	33	6	1	0	1	0	10	0	37	0	107
		発生率	66.00	1.11	0.13	0.00	0.08	0.00	1.26	0.00	4.61	0.00	14.40
	漏洩	件数	11	2	40	10	64	0	65	0	84	6	77
		発生率	22.00	0.37	5.29	7.00	5.36	0.00	8.19	0.00	10.46	48.43	10.36
平成17 (2005)	火災	件数	27	2	4	0	0	0	7	0	26	0	122
		発生率	54.15	0.37	0.54	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	3.31	0.00	16.55
	漏洩	件数	10	1	61	3	76	0	73	1	81	6	80
		発生率	20.06	0.19	8.22	2.15	6.50	0.00	9.33	0.83	10.31	48.82	10.86
平成18 (2006)	火災	件数	35	0	3	0	1	0	5	0	40	0	139
		発生率	70.30	0.00	0.41	0.00	0.09	0.00	0.65	0.00	5.19	0.00	19.07
	漏洩	件数	19	0	52	5	71	1	66	0	78	8	75
		発生率	38.16	0.00	7.12	3.65	6.22	7.29	8.53	0.00	10.12	64.72	10.29
平成19 (2007)	火災	件数	27	5	4	0	0	0	1	0	27	1	104
		発生率	53.65	0.94	0.56	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	3.56	8.20	14.53
	漏洩	件数	20	0	99	12	78	0	56	0	77	12	89
		発生率	39.74	0.00	13.80	9.02	7.04	0.00	7.37	0.00	10.15	98.44	12.43
平成20 (2008)	火災	件数	23	4	5	0	0	0	1	0	27	0	116
		発生率	45.51	0.75	0.71	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	3.65	0.00	16.44
	漏洩	件数	17	1	52	6	65	0	62	0	84	7	90
		発生率	33.64	0.19	7.38	4.65	6.02	0.00	8.34	0.00	11.36	57.80	12.75
平成21 (2009)	火災	件数	30	1	4	0	0	0	4	0	30	0	93
		発生率	58.81	0.19	0.58	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00	4.18	0.00	13.41
	漏洩	件数	19	1	49	6	54	0	68	1	67	9	86
		発生率	37.25	0.19	7.06	4.79	5.15	0.00	9.42	0.89	9.34	74.88	12.40
平成22 (2010)	火災	件数	40	2	1	0	0	0	4	0	29	0	103
		発生率	78.29	0.38	0.15	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	4.16	0.00	15.09
	漏洩	件数	16	2	56	3	55	0	42	3	69	9	102
		発生率	31.32	0.38	8.20	2.45	5.39	0.00	5.99	2.70	9.90	75.69	14.95
平成23 (2011)	火災	件数	30	6	2	0	0	0	2	0	29	1	119
		発生率	58.75	1.16	0.30	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	4.28	8.51	17.73
	漏洩	件数	26	1	62	8	55	0	52	2	79	16	95
		発生率	50.92	0.19	9.23	6.74	5.55	0.00	7.58	1.81	11.67	136.17	14.16
平成24 (2012)	火災	件数	27	2	5	1	0	0	6	0	29	0	128
		発生率	52.93	0.39	0.76	0.86	0.00	0.00	0.88	0.00	4.38	0.00	19.36
	漏洩	件数	25	1	81	6	48	0	48	0	59	11	96
		発生率	49.01	0.20	12.28	5.16	5.01	0.00	7.05	0.00	8.91	95.49	14.52
平成25 (2013)	火災	件数	32	2	2	0	0	0	6	0	22	0	124
		発生率	62.71	0.39	0.31	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	3.42	0.00	19.23
	漏洩	件数	25	1	73	5	46	0	60	0	56	9	101
		発生率	48.99	0.20	11.22	4.38	5.07	0.00	8.87	0.00	8.71	78.47	15.66
計	火災	件数	304	30	31	1	2	0	46	0	296	2	1155
		発生率	60.11	0.57	0.45	0.09	0.02	0.00	0.62	0.00	4.07	1.67	16.58
	漏洩	件数	188	10	625	64	612	1	592	7	734	93	891
		発生率	37.11	0.19	8.98	5.00	5.73	0.73	8.07	0.62	10.09	77.89	12.84

注 1) 消防庁「危険物に係る事故事例」より作成。

注 2) 件数は、各年 1 月 1 日から 12 月 31 日までの間に全国で発生した危険物に係る事故件数を表す。

注 3) 発生率は、危険物施設 1 万施設当たりの発生件数を表す（施設数は各年における 3 月 31 日現在の完成検査済証交付施設数）。

注 4) 事故件数は、震度 6 弱以上の地震によるものを除く。

表 1.2 特別防災区域の特定事業所における事故発生状況(平成 16(2004)～平成 25(2013)年)

年	事故種別	危険物施設(高圧混在施設を含む)						高圧ガス施設
		製造所	屋内貯蔵所	屋外タンク貯蔵所	移動タンク貯蔵所	移送取扱所	一般取扱所	
平成16 (2004)	火災	14	0	0	0	0	15	1
	爆発	1	0	0	0	0	0	0
	漏洩	11	0	9	0	5	18	3
	その他	0	0	3	0	0	3	2
平成17 (2005)	火災	7	1	1	0	0	23	0
	爆発	1	0	0	0	0	1	0
	漏洩	8	1	16	1	4	12	8
	その他	2	0	1	0	0	0	0
平成18 (2006)	火災	20	0	3	0	0	23	4
	爆発	4	0	0	0	0	7	0
	漏洩	22	0	23	2	6	22	2
	その他	4	0	3	0	0	0	1
平成19 (2007)	火災	12	0	2	1	0	20	0
	爆発	1	0	0	0	0	3	0
	漏洩	21	0	49	0	8	22	9
	その他	2	0	8	1	1	2	1
平成20 (2008)	火災	10	0	3	0	0	20	2
	爆発	1	0	0	0	0	5	0
	漏洩	26	0	22	1	5	25	2
	その他	2	0	5	0	1	3	2
平成21 (2009)	火災	16	0	4	0	0	18	1
	爆発	2	0	0	0	0	3	0
	漏洩	21	0	23	1	8	28	1
	その他	1	0	2	0	0	1	2
平成22 (2010)	火災	21	0	1	0	0	20	1
	爆発	0	0	0	0	0	1	1
	漏洩	17	0	27	0	8	33	4
	その他	0	0	2	0	0	2	1
平成23 (2011)	火災	11	0	0	0	1	22	1
	爆発	2	0	1	0	0	1	0
	漏洩	21	0	31	0	8	23	6
	その他	1	0	0	0	1	3	1
平成24 (2012)	火災	11	0	3	0	0	28	3
	爆発	2	0	0	0	0	1	0
	漏洩	22	0	44	0	5	30	1
	その他	2	0	6	0	1	1	0
平成25 (2013)	火災	12	0	2	0	0	22	0
	爆発	2	0	0	0	0	1	0
	漏洩	22	0	36	0	9	32	3
	その他	1	0	4	0	0	3	1
計	火災	134	1	19	1	1	211	13
	爆発	16	0	1	0	0	23	1
	漏洩	191	1	280	5	66	245	39
	その他	15	0	34	1	4	18	11
	合計	356	2	334	7	71	497	64
施設数(2013.4.1現在)		1,498	2,492	20,512	303	958	5,718	2,421
事故発生率	火災	89.45	0.40	0.93	3.30	1.04	36.90	5.37
	爆発	10.68	0.00	0.05	0.00	0.00	4.02	0.41
	流出	127.50	0.40	13.65	16.50	68.89	42.85	16.11
	その他	10.01	0.00	1.66	3.30	4.18	3.15	4.54
	合計	237.65	0.80	16.28	23.10	74.11	86.92	26.44

注 1) 消防庁特殊災害室「石油コンビナート等特別防災区域の特定事業所における事故概要」に基づいて作成。

注 2) 危険物施設数は平成 24(2012)年 4 月 1 日現在の数で、石油コンビナート等実態調査の特定事業所における危険物製造所等調による。また、高圧ガス施設数は特定事業所における高圧ガスタンクの基数調による石油コンビナート等災害防止法に係る高圧ガスタンク数としている。

注 3) 事故発生率は年間の 1 万施設当たりの事故発生件数を表し、施設数には平成 24(2012)年 4 月 1 日現在の値を用いた。

注 4) 平成 21(2009)年以降の事故件数は、一般事故(地震及び津波による事故を除く)の件数である。

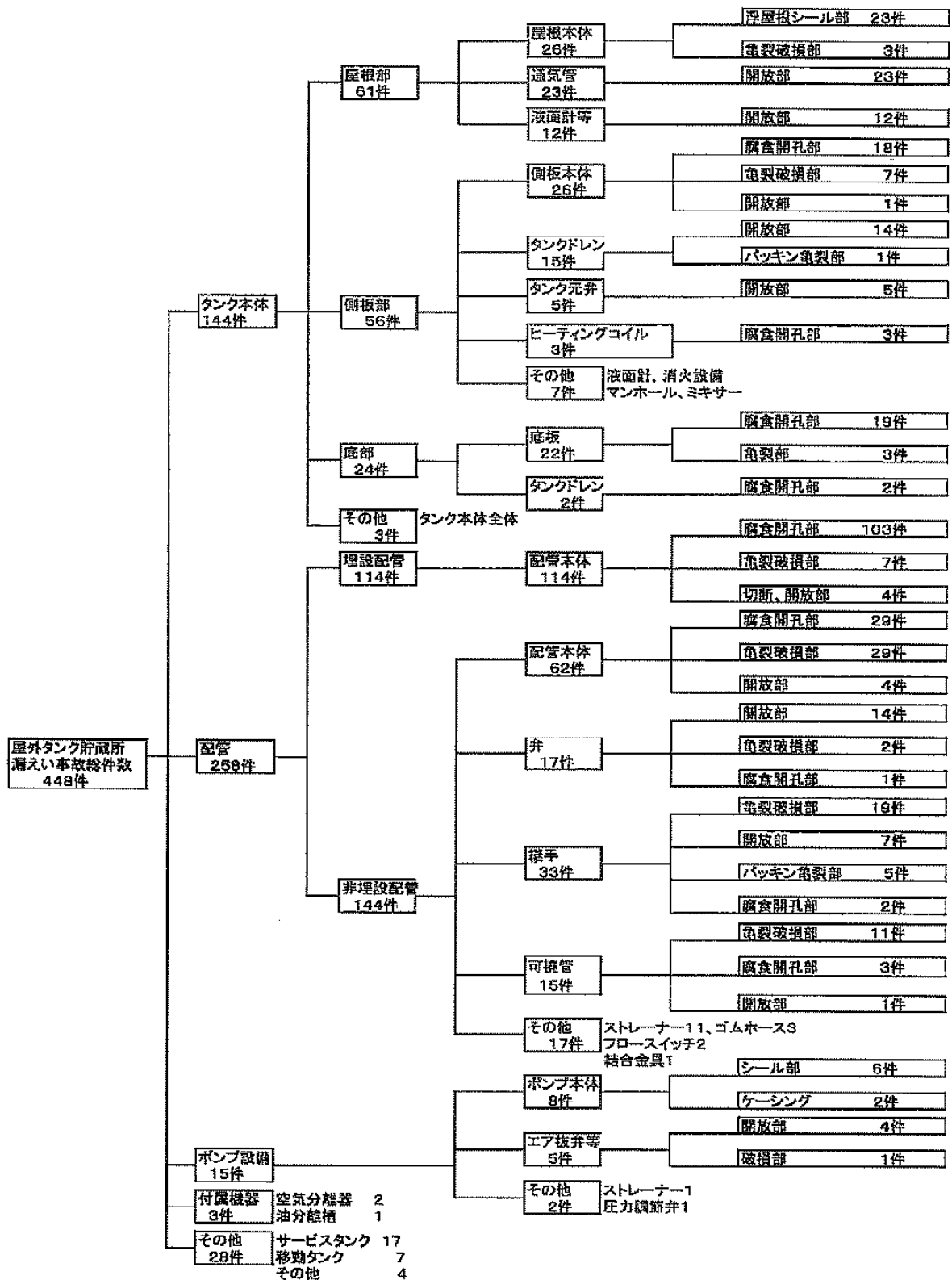


図 1.1 屋外タンク貯蔵所における流出事故の発生部位及び発生原因の分類ⁱ

ⁱ 屋外タンク貯蔵所における流出事故の状況、Safety & Tomorrow、危険物保安技術協会、No.97、P.3、2004。

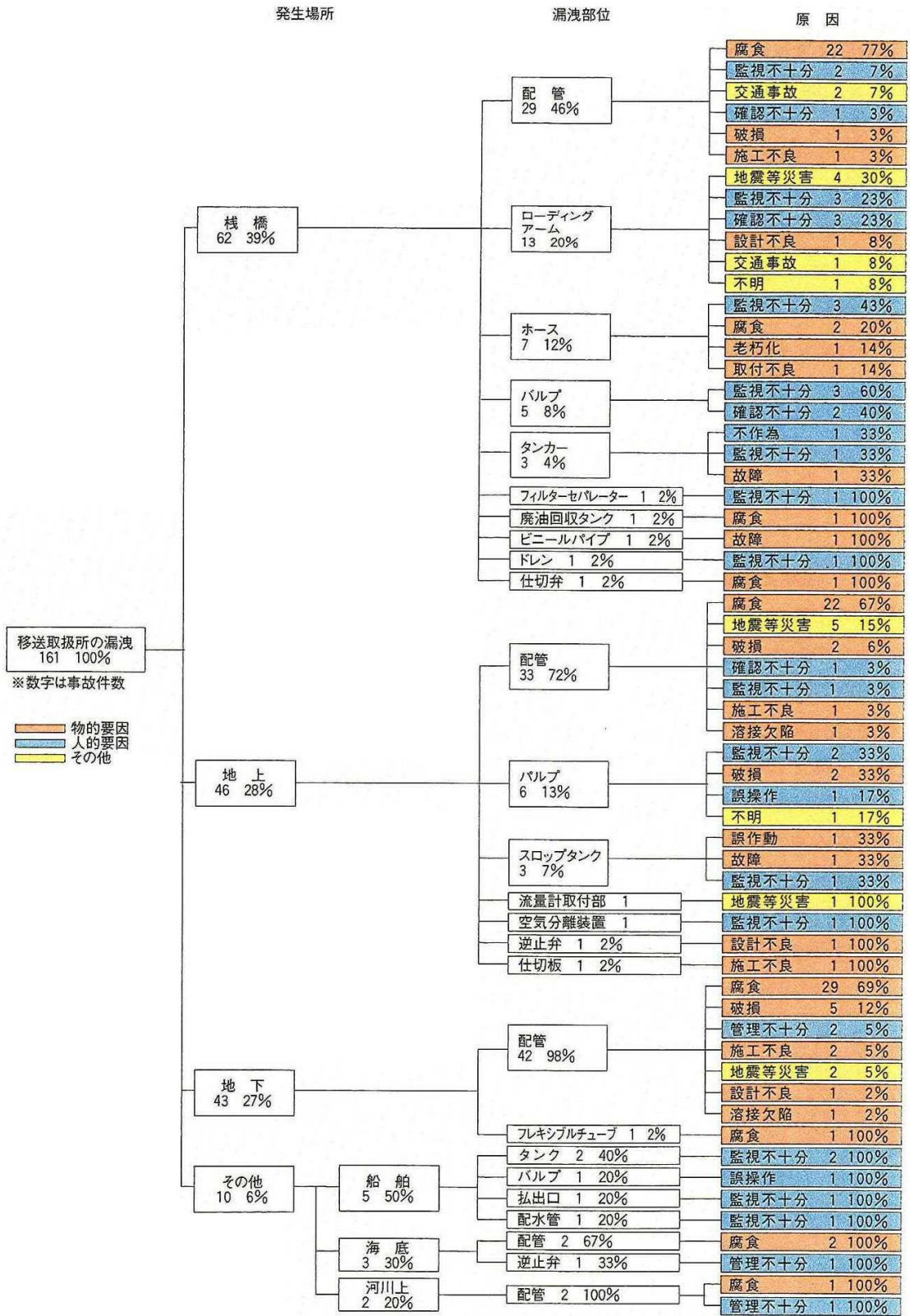


図 1.2 移送取扱所における流出事故の発生部位及び発生原因の分類ⁱ⁾

ⁱ⁾ 移送取扱所における漏洩事故の状況、Safety & Tomorrow、危険物保安技術協会、No.95、P.5、2004。

2. 東日本大震災における被害状況ⁱ

2.1 石油コンビナートの被害概要

青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島、茨城、千葉、神奈川、新潟の 10 県について、石油コンビナートで観測された震度・津波高さとの被害の概要を以下にまとめる。

【青森県】青森、むつ小川原、八戸

青森地区は津波の影響はなく、震度 4 であることから（気象庁の推計震度分布図による）、危険物施設の被害は発生していない。

むつ小川原地区の特定事業所は国家石油備蓄基地及びその関連事業所の 2 事業所である。むつ小川原地区では震度 4 以下、津波高さは 3.5m が観測されている。地震動が小さく、また備蓄基地自体は内陸部にあるため、津波でも大きな被害は発生していない。

八戸地区では最大震度 6 強、最大津波高さ 4m 程度であり、区域全体が主に浸水による被害を受けている。危険物施設に大きな被害はないものの、移送取扱所で津波に起因する微量漏洩が 1 件発生している。

【岩手県】久慈

久慈地区の特定事業所は国家石油備蓄基地 1 事業所のみであり、備蓄タンクは地下岩盤タンクである。観測された震度は 4 以下であったが、痕跡高さ 8.5m という大きな津波により、地上施設が壊滅状態となったが、地下岩盤タンクはトンネル入口の防潮扉の閉鎖により被害は発生していない。

【宮城県】仙台、塩釜

仙台地区では、最大震度 7、最大津波高さ 7m という大きな地震動・津波が観測された。被害は地震、津波のいずれによるものか判別不明のものも多いが、区域全体が浸水被害を受けている。津波後に 2 ヶ所で火災が発生し、3 ヶ所で危険物の流出が確認されている。うち 1 件の火災では、隣接する低温 LPG タンクへの延焼・爆発危険性から、火災発生の翌日に半径 2km 圏内の住民に避難指示が出されている（3 日後に解除）。なお、消火活動等は津波による瓦礫等で数日間近づくことができなかったために、道路開通後に行われた。

塩釜地区でも最大震度 7 が観測されている。最大津波高さは 1.5m であり区域全体が浸水したが、危険物施設には大きな被害は発生していない。

【秋田県】男鹿、秋田

男鹿、秋田地区にはいずれも津波の影響はない。また、男鹿地区では震度 4 であり（気象庁の推計震度分布図による）、危険物施設の被害は発生していない。

秋田地区で観測された震度は最大 5 強であり、特定事業所においては大きな被害はなかったようであるが、石油タンクの浮き屋根被害が若干発生している。

【山形県】酒田

酒田地区には津波の影響はなく、観測された震度は 4 である（気象庁の推計震度分布図による）。しかし、実地調査等の結果から、酒田地区では 2003 年十勝沖地震の際の苫小牧で観測されたものに匹敵する規模の長周期地震動が生じていたことがわかっている（消防研究センター調べ）。この影響により、インナーフロートタンクの内部浮き蓋が全破損する被害が発生している。

ⁱ 消防科学総合センター：石油コンビナートの防災アセスメント指針の改訂に係る調査検討報告書，2012

【福島県】広野、いわき

広野地区の特定事業所は火力発電所 1 事業所のみである。観測された最大震度は 6 弱、最大津波高さは 9m という大きなもので、事業所敷地内でも標高の低い海側のエリアが浸水被害を受けている。危険物施設では多数の漏洩、破損被害が発生している。

いわき地区では最大震度 6 強、最大津波高さ 2m の地震動・津波が観測され、海側の一部は浸水被害を受けている。しかし、主な被害原因は地震による地盤の液状化であり、危険物施設では漏洩 4 件が発生している。なお、いわき地区では 1 カ月後に発生した余震により、屋外タンクの沈下量が大きくなるなどの被害拡大が確認されている。

【茨城県】鹿島臨海

鹿島臨海地区では、最大震度 6 強、最大津波高さ 8m の地震動・津波が観測されているが、津波による被害は護岸部にとどまっている。危険物施設の被害の多くは地震時の液状化によるものであり、一般取扱所や移送取扱所で 3 件の漏洩が発生している。ただし、液状化被害の発生は事業所の立地場所によって大きく異なることが確認されている。また、可燃性のガスホルダー 2 基（高圧ガス施設ではない）において爆発火災が発生している。

【千葉県】京葉臨海北部、京葉臨海中部、京葉臨海南部

京葉臨海北部地区では、最大震度 6 弱、最大津波高さ 2m 強の地震動・津波が観測されているが、浸水被害は発生していない。危険物施設の被害は、屋内貯蔵所において容器が落下したことによる漏洩が 3 件、屋外タンク貯蔵所の付属施設である配管からの漏洩が 1 件発生している。

京葉臨海中部地区では、最大震度 6 弱、最大津波高さ 1.5m の地震動・津波が観測されているが、浸水被害は発生していない。危険物施設の被害は漏洩 2 件、破損 7 件が発生しているが、すべてスロッシングによる被害であり、浮き屋根上への漏洩やドレン配管から防油堤内への漏洩、浮き屋根やガイドポールの破損等である。危険物施設以外では、LPG タンク倒壊により計 17 基のタンクが爆発または焼損した火災の他、LNG 貯蔵タンクの液面計の取り出し配管が折れたことによる漏洩が 1 件、変圧器からの絶縁油の漏洩が 1 件発生している。LPG タンクの火災は、球形ガスタンク（地震発生当時満水状態であった）の支柱が破断してタンクが倒壊し、周辺の配管から LPG が漏洩、その後火災となったもので、火災発生からおよそ 1～2 時間後に隣接する LPG タンクが次々と爆発して火災が拡大した。この爆発の直後に市原市五井地区への避難勧告が出され、翌朝解除されている。

京葉臨海南部地区では、最大震度 5 弱、最大津波高さ 2.5m の地震動・津波が観測されているが、浸水被害は発生していない。危険物施設等では、特に大きな被害は発生していない。

【神奈川県】京浜臨海、根岸臨海、久里浜

京浜臨海地区では、最大震度 5 強、最大津波高さ 2m の地震動・津波が観測されているが、浸水被害は発生していない。危険物施設の被害は、屋外タンク貯蔵所において浮き屋根上に油が滞留し、地震から 3 日後に浮き屋根が沈没した事例が 1 件発生したほか、浮き屋根上やポンツーン内への漏洩などのスロッシング被害が 6 件、屋内貯蔵所において容器が落下したことによる漏洩が 2 件発生している。その他、可燃性ガス施設において、LPG 配管フランジ部よりブタンガスの漏洩が 1 件発生している。

根岸臨海地区では、最大震度 5 強、最大津波高さ 2m の地震動・津波が観測されているが、浸水被害は発生していない。危険物施設の被害は、屋外タンク貯蔵所のルーフトレン配管が破損したことによる漏洩が 1 件、移送取扱所（棧橋）の配管フランジ部からの微量漏洩が 1 件発生している。

久里浜地区で観測された最大震度は 5 弱であり（気象庁の推計震度分布図による）、浸水被害は発生していない。危険物施設の被害は発生していない。

【新潟県】新潟東港、新潟西港、直江津

新潟東港、新潟西港、直江津地区では津波の影響はなく、観測された震度は4である（気象庁の推計震度分布図による）。危険物施設の被害はスロッシングによる屋外タンク貯蔵所の被害であり、新潟東港地区において5件の漏洩、15件の破損が発生している（消防庁まとめ）。

2.2 危険物施設の被害

消防庁において実施された「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」ⁱでは、東日本大震災で被害を受けたおそれのある危険物施設について、被害の概要を調査している。このうち、被災率の高かった製造所、屋外タンク貯蔵所、移送取扱所について、宮城県、福島県、茨城県、千葉県、神奈川県、石油コンビナートに所在する特定事業所の被害状況を整理する。対象事業所数は5県で215事業所である。

表2.1は、施設種別毎の被災施設数と主な被害原因である。

表2.2～2.4は、製造所、屋外タンク貯蔵所、移送取扱所の主な被害原因・事故種別毎の被害件数である。

表2.5は、主な被害原因が地震であるものについて、本震で観測された震度別の被害状況をまとめたものである。

表 2.1 施設種別毎の被災施設数と主な被害原因（石油コンビナート）

施設種別	施設数	被災施設数	被災率	主な被害原因		
				地震	津波	判別不明
製造所	503	45	8.9%	38	0	7
屋外タンク貯蔵所	7,300	278	3.8%	188	56	34
移送取扱所	440	24	5.5%	18	6	0
合計	8,243	347	4.2%	244	62	41

表 2.2 主な被害原因・事故種別毎の被害件数（製造所）

主な被害原因/事故種別	火災	漏洩	破損	その他	計
地震	0	0	34	4	38
津波	0	0	0	0	0
判別不能	0	0	7	0	7
計	0	0	41	4	45

表 2.3 主な被害原因・事故種別毎の被害件数（屋外タンク貯蔵所）

主な被害原因/事故種別	火災	漏洩	破損	その他	計
地震	0	14	115	59	188
津波	1	2	47	6	56
判別不能	0	3	31	0	34
計	1	19	193	65	278

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

表 2.4 主な被害原因・事故種別毎の被害件数（移送取扱所）

主な被害原因/事故種別	火災	漏洩	破損	その他	計
地震	0	3	14	1	18
津波	0	1	4	1	6
判別不能	0	0	0	0	0
計	0	4	18	2	24

表 2.5 震度別の被害状況（地震による被害）

施設種別	震度	7	6強	6弱	5強	5弱	4以下	不明	計
製造所	施設数	0	12	56	131	264	24	16	503
	地震による被害数	0	2	20	14	2	0	0	38
	被災率	-	16.7%	35.7%	10.7%	0.8%	0.0%	0.0%	7.6%
屋外タンク貯蔵所	施設数	21	224	817	2352	3366	326	194	7300
	地震による被害数	2	20	107	33	14	1	11	188
	被災率	9.5%	8.9%	13.1%	1.4%	0.4%	0.3%	5.7%	2.6%
移送取扱所	施設数	1	9	43	83	287	12	5	440
	地震による被害数	0	0	14	2	0	0	2	18
	被災率	0.0%	0.0%	32.6%	2.4%	0.0%	0.0%	40.0%	4.1%

注) 震度 6 強や 7 が観測された地区については、施設数が少ないために被災率が小さくなっている。

2.3 高圧ガス施設の被害

経済産業省は、北海道から静岡県までの太平洋側の道県及び震度 5 強以上震度を観測した県のコンビナート等保安規則（以下、「コンビ則」という）適用事業所（11 県の 158 事業所）を対象に、津波及び地震の被害についてアンケートを実施し、すべての事業所から回答を得ている。表 2.6 は、被害状況をまとめたものである。

表 2.6 石油コンビナートにおける高圧ガス施設の被害状況ⁱ

道府県	事業所数	被害の有無 (事業所数)		被害の分類毎の事業所数(複数回答あり)					被害を受けた事業所の 震度・加速度の最低値	
		無し	有り	火災・爆発	漏洩	高圧ガス の通る部 分の損傷	基礎等の 構造物の 損傷	不明・調査 中	震度	gal
北海道	4	4								
青森県	2	1	1			1	1		5弱	
宮城県	3	0	3	1	2	3	2	1	6強	464
福島県	2	0	2			1	1	1	6弱	310
栃木県	2	0	2		1		2		5強	259
群馬県	1	1	0							
茨城県	42	20	22		1	8	11	6	5強	197
千葉県	43	36	7	3	2	3	1		5弱	98
神奈川県	57	52	5			4	2		5弱	111
新潟県	1	1								
静岡県	1	1								
合計	158	116	42	4	6	20	20	8		

ⁱ 総合資源エネルギー調査会・高圧ガス及び火薬類保安分科会・高圧ガス部会：東日本大震災を踏まえた高圧ガス施設等の地震・津波対策について、2012

資料2 災害影響の算定手法

1. 流出モデル

(1) 液体流出

危険物質を液相で貯蔵した容器（または付属配管で容器に近いところ）が破損したときの流出率は次式で与えられる。ただし、容器の大きさに比べて流出孔が十分に小さく、流出が継続する間は液面の高さは変化しないことを前提とする。

$$q_L = ca \sqrt{2gh + \frac{2(p-p_0)}{\rho}} \quad (\text{式1})$$

ただし、

- q_L : 液体流出率 (m³/s)
- c : 流出係数 (不明の場合は 0.5 とする)
- a : 流出孔面積 (m²)
- p : 容器内圧力 (Pa)
- p₀ : 大気圧力 (=0.101 MPa=0.101×10⁶ Pa)
- ρ : 液密度 (kg/m³)
- g : 重力加速度 (= 9.8m/s²)
- h : 液面と流出孔の高さの差 (m)

長い配管から流出するような場合には、配管内壁と流体との摩擦による圧力損失を考慮すべきであるが、これを無視して次式により安全サイドの評価として概算することができる。

$$q_L = ca \sqrt{v^2 + \frac{2(p-p_0)}{\rho}} \quad (\text{式2})$$

ただし、

- v : 配管内の流速 (m/s)
- p : 送出圧力 (Pa)

(2) 気体流出

容器内に物質が気相で存在する場合の流出率は次式で与えられる。ただし、容器のサイズに比べて流出孔が十分に小さく、気体の噴出に熱的変化がないことを仮定している。

① 流速が音速未満 (p₀/p > γc) のとき

$$q_G = cap \sqrt{\frac{2M}{ZRT} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left\{ \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad (\text{式3})$$

② 流速が音速以上 ($p_0/p \leq \gamma_c$) のとき

$$q_G = cap \sqrt{\frac{M}{ZRT} \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (\text{式 4})$$

ただし、

$$\gamma_c = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

q_G : 気体流出率 (kg/s)

c : 流出係数 (不明の場合は 0.5 とする)

a : 流出孔面積 (m²)

p : 容器内圧力 (Pa)

p_0 : 大気圧力 (=0.101 MPa=0.101×10⁶ Pa)

M : 気体のモル重量 (kg/mol)

T : 容器内温度 (K)

γ : 気体の比熱比

R : 気体定数 (=8.314 J/mol・K)

Z : ガスの圧縮係数 (=1.0 : 理想気体)

2. 蒸発モデル

(1) 揮発性液体の蒸発

常温の揮発性液体が流出して矩形の囲いの中に溜まった場合、液面からの蒸発量は風速に支配され次式で与えられる。ⁱ

$$w = 0.033 \rho_g u \left(\frac{p_v}{p_0} \right) \left(\frac{v}{ul} \right)^{0.2} \quad (\text{式 5})$$

ただし、

w : 蒸発率 (kg/m²s)

ρ_g : 周辺温度における蒸気密度 (kg/m³)

p_v : 液面温度での飽和蒸気圧(Pa)

p_0 : 大気圧 (=0.101 MPa=0.101×10⁶ Pa)

u : 風速 (m/s)

l : 風方向の囲いの長さ (m)

v : 空気の動粘性係数 (=0.151×10⁻⁴ m²/s : 20℃
=0.154×10⁻⁴ m²/s : 25℃)

ⁱ 佐藤公雄：揮発性液体の風による蒸発，安全工学，Vol.18，No.2，1979

(2) 過熱液体の蒸発

沸点以上の温度で圧力をかけて液化したガスが漏洩して瞬間的に気化する現象をフラッシュと呼び、気化する液量と流出した液量の比をフラッシュ率と呼ぶ。フラッシュ率はガスの種類と流出前の温度によって決まり、次式で与えられる。

$$f = \frac{H - H_b}{h_b} = C_p \frac{T - T_b}{h_b} \quad (\text{式6})$$

ただし、

f : フラッシュ率

T : 液体の貯蔵温度 (K)

H : 液体の貯蔵温度におけるエンタルピー (J/kg)

T_b : 液体の大気圧での沸点 (K)

H_b : 液体の沸点におけるエンタルピー (J/kg)

C_p : 液体の比熱 (T_b ~ Tの平均 : J/kg・K)

h_b : 沸点での蒸発潜熱 (J/kg)

3. 拡散モデル

ガスが流出して大気中で拡散したときの濃度分布を計算するための簡易モデルとしてガウシアンモデルがある。このモデルは、ガスの進行方向（風下方向）に対して直角方向の濃度分布を正規分布と仮定して解析するものである。ガウシアンモデルにはいくつかのものがあるが、海外ではブルームモデル（Pasquill-Gifford モデル）、国内では坂上モデルがよく用いられているようであり、本調査でも坂上モデル（連続点源の式）を適用する。以下にこれらのモデルを示す。なお、ガウシアンモデルでは、対象とするガスの密度が周囲の空気密度と同程度であることを仮定している。空気よりも非常に軽いガスや重いガスの場合には、実際の拡散距離とガウシアンモデルによる算定値にかなりの差が生じるものと考えられ、注意が必要である。

(1) 坂上モデル

坂上モデルには、ガスの発生源が点源と面源、ガスの発生時間が連続的と瞬間的の計4種類がある。点源の式は小さな開口部からガスが流出するような場合、面源の式は流出した液化ガスが防液堤に溜まって蒸発するような場合に適用される。以下に、よく用いられるガスの発生が連続的な点源と面源の式を示す。防液堤に溜まって蒸発するような場合でも、防液堤から遠いところでは面からの蒸発ガス量が1点から発生するとして点源の式を用いてもよい。

① 連続点源の式

連続点源を想定したときの濃度分布は次式で与えられる。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{uB\sqrt{\pi A}} \exp\left(\frac{-y^2}{A}\right) \exp\left(\frac{-(h+z)}{B}\right) I_0\left(\frac{2\sqrt{hz}}{B}\right) \quad (\text{式7})$$

$$A = q_A \{ \phi_A x + \exp(-\phi_A x) - 1 \}$$

$$B = q_B \{ \phi_B x + \exp(-\phi_B x) - 1 \}$$

ただし、

C_{xyz} : 任意の地点 (x, y, z) のガス濃度 (体積比率)

x は水平風下方向、y は水平風横方向、z は鉛直方向にとった座標

Q : 単位時間あたりの拡散ガス量 (m³/s)

u : 風速 (m/s)

h : ガス発生源の高さ (m)

(0, 0, h) が発生源の座標となる。

q_A, q_B, φ_A, φ_B : 拡散パラメータ (表 1)

I₀ : 0 次の虚数単位ベッセル関数 (I₀(X)=J₀(iX) : J₀ は 0 次ベッセル関数)

表 1 坂上モデルの拡散パラメータの値ⁱ

大気安定度	h(m)	φ _A	√q _A	φ _B	q _B
安 定	0.5	4.78×10 ⁻²	4.26	4.20×10 ⁻²	3.50×10 ⁻¹
	10	4.78×10 ⁻²	4.26	4.60×10 ⁻²	2.93×10 ⁻¹
	20	4.78×10 ⁻²	4.26	4.71×10 ⁻²	2.86×10 ⁻¹
	30	4.78×10 ⁻²	4.26	4.77×10 ⁻²	2.83×10 ⁻¹
中 立	0.5	1.48×10 ⁻²	1.56×10 ¹	1.10×10 ⁻²	5.30
	10	1.09×10 ⁻²	2.18×10 ¹	2.46×10 ⁻²	1.02
	20	1.01×10 ⁻²	2.37×10 ¹	3.00×10 ⁻²	7.00×10 ⁻¹
	30	0.97×10 ⁻²	2.48×10 ¹	3.29×10 ⁻²	5.65×10 ⁻¹
やや不安定	0.5	4.50×10 ⁻³	7.59×10 ¹	4.25×10 ⁻³	3.48×10 ¹
	10	2.12×10 ⁻³	1.59×10 ²	1.48×10 ⁻²	2.87
	20	1.80×10 ⁻³	1.88×10 ²	1.98×10 ⁻²	1.61
	30	1.61×10 ⁻³	2.09×10 ²	2.34×10 ⁻²	1.14
不安定	0.5	1.12×10 ⁻³	2.77×10 ²	1.30×10 ⁻³	3.73×10 ²
	10	2.52×10 ⁻⁴	1.24×10 ³	7.20×10 ⁻³	1.18×10 ¹
	20	1.78×10 ⁻⁴	1.73×10 ³	1.10×10 ⁻²	5.19
	30	1.44×10 ⁻⁴	2.14×10 ³	1.40×10 ⁻²	3.21

液体で流出したときには、式 1 または式 2 で求められる流出率 q_L (m³/s) をもとに、次式により拡散ガス量 Q (m³/s) を計算し、これを式 7 に代入して拡散ガス濃度を計算する。

ⁱ 坂上治郎：坂上式の拡散パラメータと二、三の計算式について、高圧ガス、Vol.19, No.4, 1982

$$Q = \frac{q_L f \rho R T}{M p_0} \quad (\text{式 8})$$

ただし、

f : フラッシュ率

ρ : 液密度 (kg/m³)

R : 気体定数 (= 8.314 J/mol·K)

T : 大気温度 (K)

p_0 : 大気圧 (= 0.101 MPa = 0.101 × 10⁶ Pa)

M : 気体のモル重量 (kg/mol)

小量流出の場合には、すべて気化するとして $f = 1$ としてよい。また、気体で流出したときには、式 3 または式 4 で求められる流出率 q_G (kg/s) をもとに、次式により拡散ガス量 Q (m³/s) を計算する。

$$Q = \frac{q_G R T}{M p_0} \quad (\text{式 9})$$

なお、風下方向・地表面 ($y=0$ 、 $z=0$) の濃度のみ計算する場合には、式 7 は次のように簡単になる。

$$C_x = \frac{Q}{uB\sqrt{\pi A}} \exp\left(-\frac{h}{B}\right) \quad (\text{式 10})$$

② 連続面源の式

連続面源を想定したときの濃度分布は次式で与えられる。

$$C_{xyz} = \frac{Q e^{-\frac{z+h}{B}} \sqrt{A}}{4uB} \left\{ \Lambda\left(\frac{x+n}{\sqrt{A}}\right) - \Lambda\left(\frac{x-n}{\sqrt{A}}\right) \right\} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{y+m}{\sqrt{A}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-m}{\sqrt{A}}\right) \right\} I_0\left(\frac{2\sqrt{hz}}{B}\right) \quad (\text{式 11})$$

$$\Lambda(\eta) = \eta \operatorname{erf}(\eta) + \eta + \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\eta^2}$$

$$\operatorname{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-t^2} dt \quad (\text{誤差関数})$$

ただし、

C_{xyz} : 任意の地点 (x, y, z) のガス濃度 (体積比率)

Q : 単位時間、単位面積あたりの拡散ガス量 (m³/m²s)

m : 風に直角方向の面源の幅の 1/2 (m)

n : 風方向の面源の幅の 1/2 (m)

であり、その他の記号は点源式 (式 7) と同じである。

なお、風下方向・地表面 (y=0、z=0) の濃度のみ計算する場合には、式7は次のように簡単になる。

$$C_x = \frac{Qe^{-\frac{h}{B}\sqrt{A}}}{4uB} \left\{ \Lambda\left(\frac{x+n}{\sqrt{A}}\right) - \Lambda\left(\frac{x-n}{\sqrt{A}}\right) \right\} \left\{ 2\operatorname{erf}\left(\frac{m}{\sqrt{A}}\right) \right\} \quad (\text{式 12})$$

(2) プルームモデル (Pasquill-Gifford モデル)

プルームモデルは、坂上モデルの連続点源式に該当するモデルで、任意の地点のガス濃度は次式で表される。この式は、海外のリスク評価、また国内でも大気汚染の分野でよく用いられている。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (\text{式 13})$$

ただし、

C_{xyz} : 任意の地点(x,y,z)のガス濃度 (kg/m³)

Q: 単位時間あたりの拡散ガス量 (kg/s)

u: 風速 (m/s)

h: ガス発生源の高さ (m)

σ_y, σ_z : 拡散係数 (y 方向、z 方向の濃度分布の標準偏差: m)

σ_y, σ_z は大気安定度 (Pasquill の区分A~F) 別に次式で与えられるが、石油コンビナートに適用する場合は Rural Conditions を選択するのが妥当と考えられる。

[Rural Conditions (地方)]

A	: $\sigma_y=0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.20x$: 強不安定
B	: $\sigma_y=0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.12x$: 不安定
C	: $\sigma_y=0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$: 弱不安定
D	: $\sigma_y=0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$: 中立
E	: $\sigma_y=0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.03x(1+0.0003x)^{-1}$: 弱安定
F	: $\sigma_y=0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.01x(1+0.0003x)^{-1}$: 強安定

[Urban Conditions (都市)]

A・B	: $\sigma_y=0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.24x(1+0.001x)^{-1/2}$
C	: $\sigma_y=0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.20x$
D	: $\sigma_y=0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.14x(1+0.003x)^{-1/2}$
E・F	: $\sigma_y=0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$\sigma_z=0.08x(1+0.0015x)^{-1/2}$

ⁱ CCPS AIChE: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2000

4. 火災・爆発モデル

(1) 液面火災

ア. 火災の放射熱

火災から任意の相対位置にある面が受ける放射熱は次式で与えられる。

$$E = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{式 14})$$

ただし、

E : 放射熱強度 (W/m²)

T : 火炎温度 (K)

σ : ステファン・ボルツマン定数 (=5.67×10⁻⁸ W/m²K⁴)

ε : 放射率

φ : 形態係数(0.0~1.0 の無次元数)

実用上は、燃焼液体が同じであれば火炎温度と放射率は変わらないと仮定し、 $R_f = \varepsilon \sigma T^4$ (W/m²) とおいて次式で計算してよい。

$$E = \phi R_f \quad (\text{式 15})$$

ここで R_f は放射発散度と呼ばれ、主な可燃性液体については表 2 に示すような値をとる。

表 2 主な可燃性液体の放射発散度ⁱ

可燃性液体	放射発散度 (kW/m ²)	可燃性液体	放射発散度 (kW/m ²)
カブジ原油	41	メタノール	9.8
ガソリン・ナフサ	58	エタノール	12
灯油	50	LNG (メタン)	76
軽油	42	エチレン	134
重油	23	プロパン	74
ベンゼン	62	プロピレン	73
n-ヘキサン	85	n-ブタン	83

イ. 形態係数

① 円筒形の火災

円筒形の火災を想定し、図 1 に示すように火炎底面と同じ高さにある受熱面を考えたとき、形態係数は次式により与えられる。また、受熱面が火炎底面と異なる高さにある場合の形態係数の計算は図 2 のように計算する。

ⁱ 石油コンビナート防災診断委員会：石油コンビナート災害想定の手法(消防地第 180 号), 1980

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right] \quad (\text{式 16})$$

$$A = (1 + n)^2 + m^2$$

$$B = (1 - n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ただし、

H : 火炎高さ

R : 火炎底面半径

L : 火炎底面の中心から受熱面までの距離

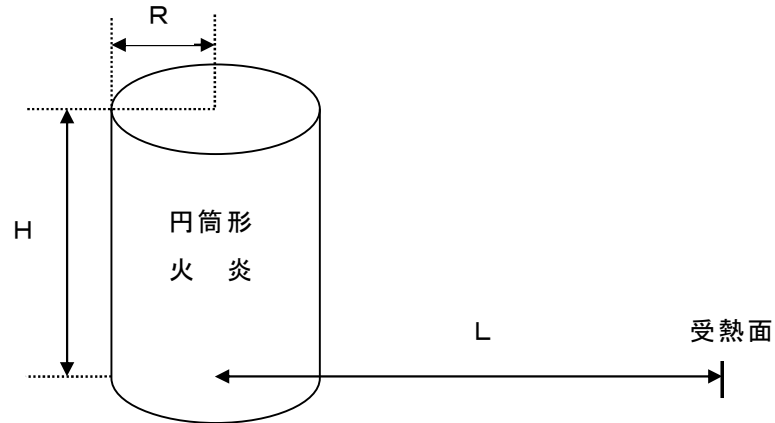


図1 円筒形火炎と受熱面の位置関係

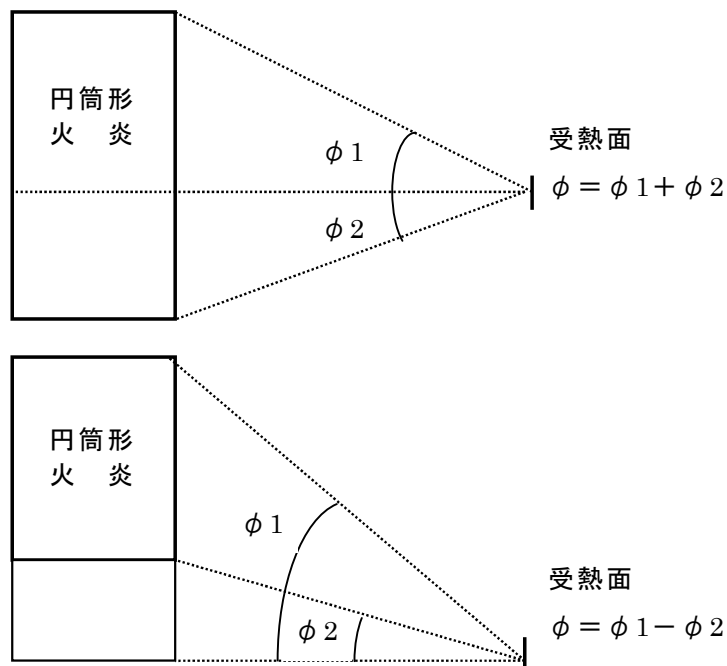


図2 受熱面の高さによる形態係数の計算例

② 直方体の火炎

直方体の火炎を想定したときの形態係数は、図3に示すような受熱面の位置に対して次式により与えられる。

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{\sqrt{X^2 + 1}} \tan^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + 1}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{Y^2 + 1}} \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{Y^2 + 1}} \right) \right] \quad (\text{式 17})$$

$$X = H/L$$

$$Y = W/L$$

ただし、

H：火炎高さ

W：火炎前面幅

L：火炎前面から受熱面までの距離

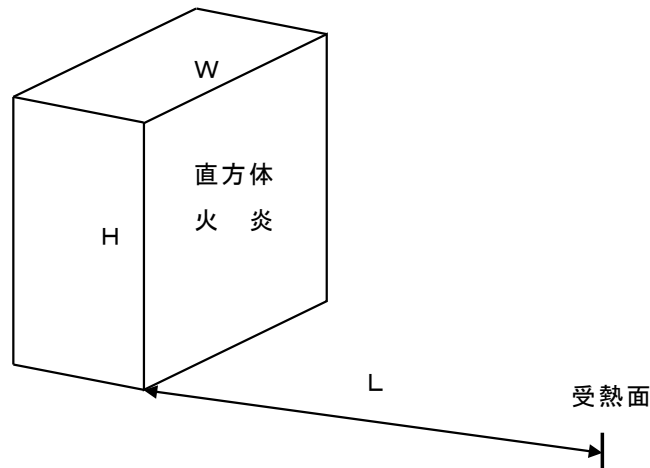


図3 直方体火炎と受熱面の位置関係

ウ. 火炎の想定

液面火災による放射熱を計算するためには火炎の形状を決める必要があり、一般に次のような想定がよく用いられる。

① 流出火災

可燃性液体が小さな開口部から流出し、直後に着火して火災となるような場合には、火災面積は次式で表わされる。

$$S = \frac{q_L}{V_B} \quad (\text{式 18})$$

ただし、

S：火災面積 (m²)

Q_L : 液体の流出率 (m³/s)

V_B : 液体の燃焼速度 (液面降下速度 : m/s)

燃焼速度は、可燃性液体によって固有の値をとり、主な液体については表3に示すとおりである。流出火災については、式18で得られる火災面積と同面積の底面をもち、高さが底面半径の3倍 ($m=H/R=3$) の円筒形火炎を想定して放射熱の計算を行う。

表3 主な可燃性液体の燃焼速度 (液面降下速度)ⁱ

可燃性液体	燃焼速度 (m/s)	可燃性液体	燃焼速度 (m/s)
カフジ原油	0.52×10^{-4}	メタノール	0.28×10^{-4}
ガソリン・ナフサ	0.80×10^{-4}	エタノール	0.33×10^{-4}
灯油	0.78×10^{-4}	LNG (メタン)	1.7×10^{-4}
軽油	0.55×10^{-4}	エチレン	2.1×10^{-4}
重油	0.28×10^{-4}	プロパン	1.4×10^{-4}
ベンゼン	1.0×10^{-4}	プロピレン	1.3×10^{-4}
n-ヘキサン	1.2×10^{-4}	n-ブタン	1.5×10^{-4}

② タンク火災

可燃性液体を貯蔵した円筒形タンクの屋根全面で火災となった場合には、タンク屋根と同面積の底面をもち、高さが底面半径の3倍 ($m=H/R=3$) の円筒形火炎を想定して放射熱の計算を行う。

③ 防油堤火災

可燃性液体が流出し防油堤や仕切堤などの囲いの全面で火災となった場合には、囲いと同面積の底面をもち、高さが底面半径の3倍 ($m=H/R=3$) の円筒形火炎を想定する。

エ. 火炎の規模による放射発散度の低減

液面火災では、火災面積 (円筒底面) の直径が 10m を超えると、空気供給の不足により大量の黒煙が発生し放射発散度が低減する。したがって、このことを考慮せずに上記の手法で放射熱を計算すると、火災規模が大きいときにはかなりの過大評価となる。

実験により得られた火炎 (燃焼容器) 直径と放射発散度との関係を図4に示す。これによると、火炎直径が 10m になると放射発散度の低減率は約 0.6、20m で約 0.4、30m で約 0.3 となる。

ただし、アルコールや LNG は燃焼しても黒煙が発生しにくいいため、放射発散度は低減しないものとするのが妥当である。

ⁱ 石油コンビナート防災診断委員会：石油コンビナート災害想定の手法(消防地第180号), 1980

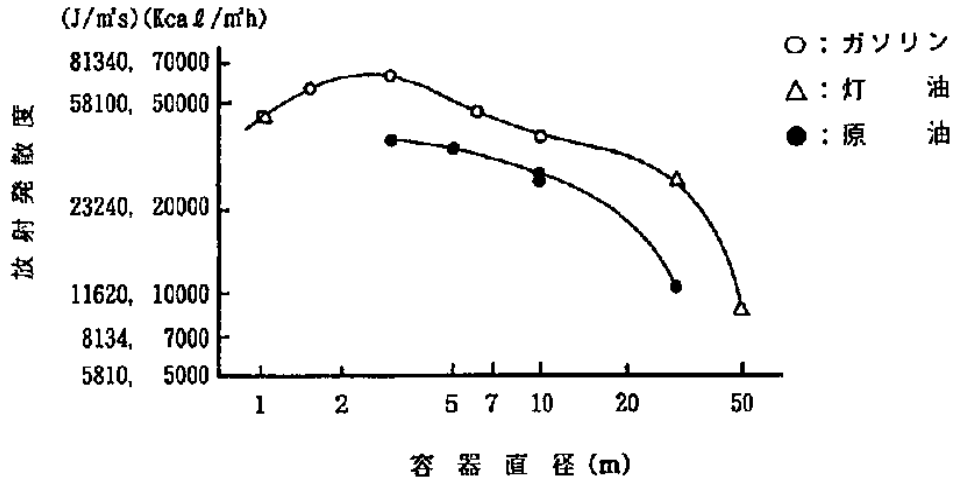


図4 火炎直径と放射発散度との関係ⁱ

一方、平成10年から11年に石油公団（現石油天然ガス・金属鉱物資源機構）が消防研究所（現消防庁消防大学校消防研究センター）等と共同で行った燃焼実験の結果、燃焼容器直径（D）と放射発散度の低減率（r）の関係として次式が示されている（図5）。

$$r = \exp(-0.06D) \quad (\text{式 } 19)$$

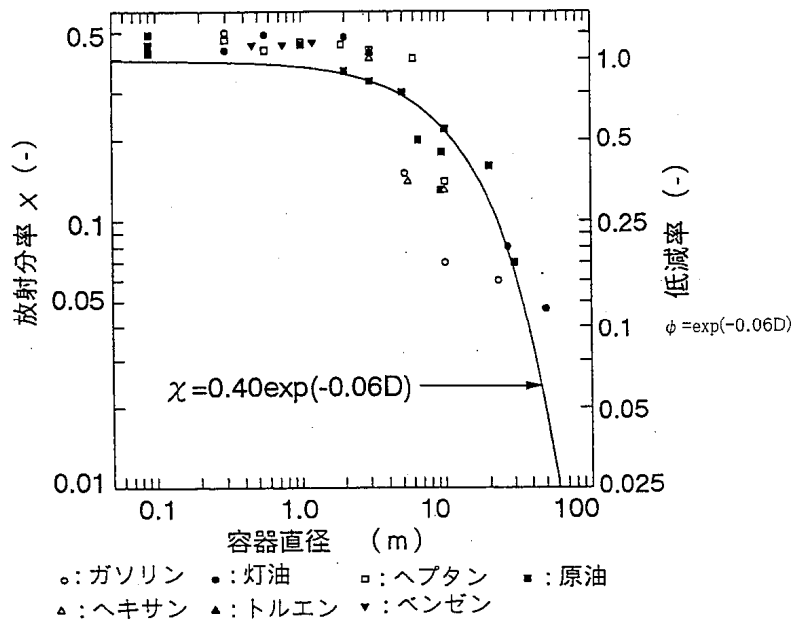


図5 各種燃料の放射分率と容器直径との関係ⁱⁱ

ⁱ 湯本太郎他：大規模石油火災からの放射熱の推定，安全工学，Vol.21，No.4，1982

ⁱⁱ 石油タンク等の災害想定について，石油公団・危険物保安技術協会，2002

式 19 によると、D=20m に対して r=0.3、D=30m に対して r=0.17 という低減率になるが、火炎直径の大きいところでのデータが少ないため、r=0.3 程度の値を下限としたほうがよいと考えられる。

オ. タンク全面火災への風の影響

風による火炎の傾きを求める算式は、湯本 (1977)ⁱ により示されている (式 20)。これは、ガソリン火災の風による炎の傾きを整理したものである。この式を使用して火炎の傾き θ を求め、計算地点の座標を変換することにより (式 21)、風により炎が傾いた場合の放射熱の影響を算定することができる。

$$\tan \theta = (u^2/D)^{0.38} \dots\dots\dots (式 20)$$

θ : 鉛直方向から測った炎の傾斜角

u : 風速(m/s)

D : 火災面の直径(m)

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \dots\dots\dots (式 21)$$

x, y : 計算地点の座標

x', y' : 変換後の計算地点の座標

θ : 鉛直方向から測った炎の傾斜角

図 6 は、容量 8 万 5 千 kl の原油タンク (直径 77m、高さ 20m) の全面火災について、風速 5m/s の場合の放射熱の算定例を示したものである。

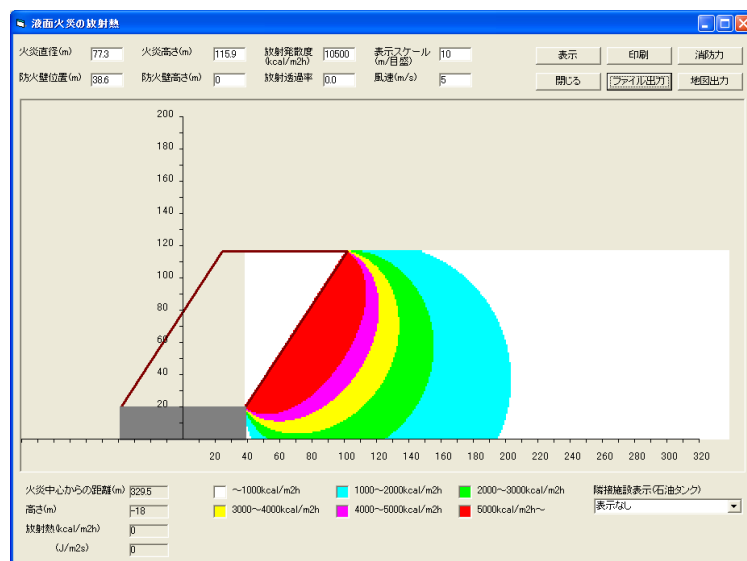


図 6 風の影響を考慮したタンク全面火災の放射熱の算定例 (風速 5m/s)

ⁱ 湯本太郎:安全工学,Vol.16,No.1,P.58,1977

(2) 蒸気雲爆発

流出した可燃性ガス（液化ガスを含む）が拡散し、空気との混合が進んだ後に着火した場合、激しい爆風圧を発生する爆轟が起こる可能性がある。この際の爆風圧と爆発中心からの距離との関係は、TNT 等価法による次式で与えられる。

$$L = \lambda \sqrt[3]{W_{TNT}} = \lambda \sqrt[3]{\frac{W_G f \psi Q_G \gamma}{Q_{TNT}}} \quad (\text{式 22})$$

ここで、

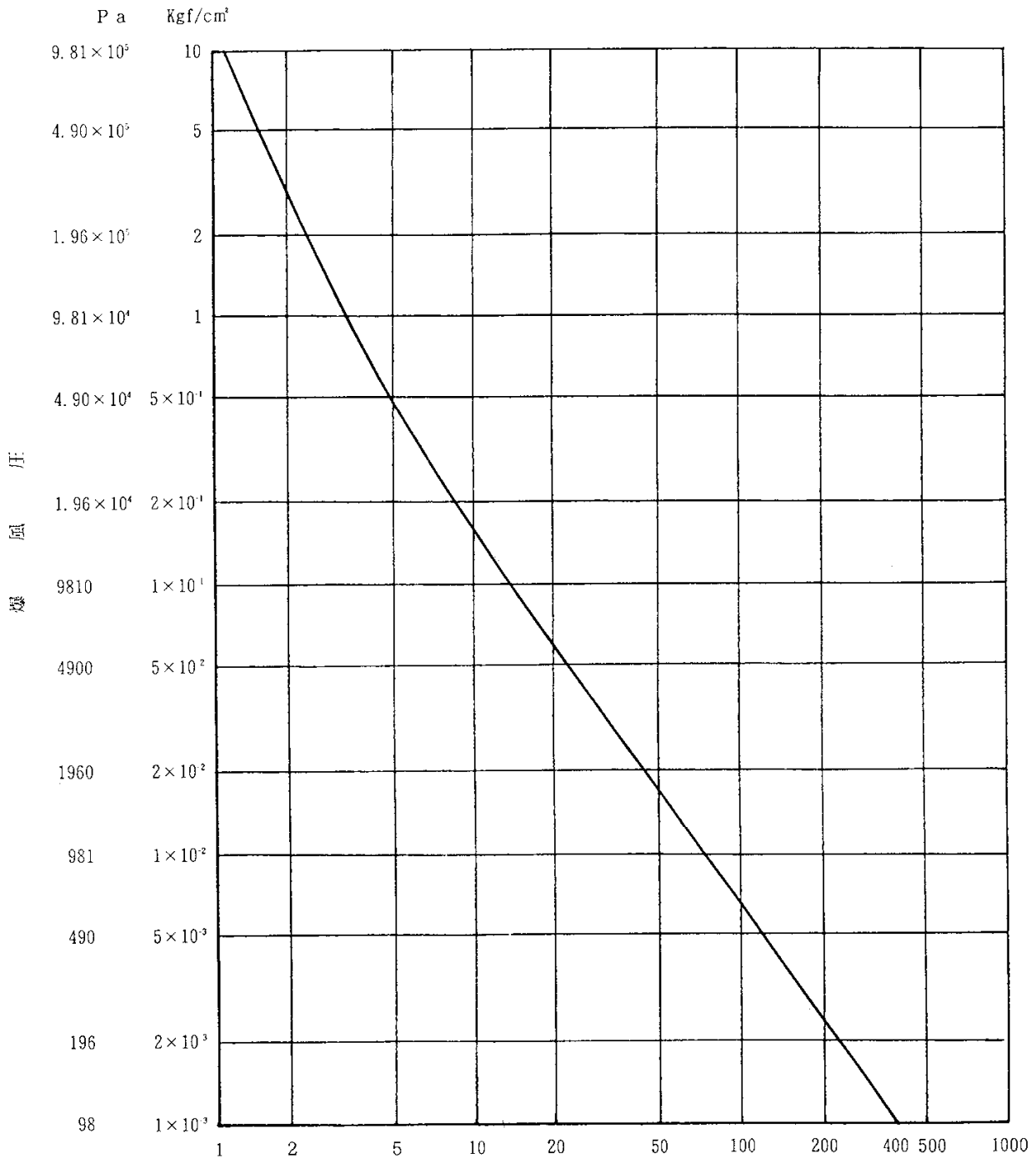
- L : 爆発中心からの距離 (m)
- λ : 換算距離 (m/kg^{1/3})
- W_{TNT} : 等価の TNT 火薬量 (TNT 当量 : kg)
- W_G : 可燃性ガス (液体) の流出量 (kg)
- Q_G : 可燃性ガスの燃焼熱量 (J/kg)
- Q_{TNT} : TNT 火薬の燃焼熱量 (=4.184×10⁶ J/kg)
- f : 流出したガスの気化率 (フラッシュ率)
- ψ : 爆発係数 (=0.1)
- γ : TNT 収率 (=0.064)

爆発係数 ψ は流出・気化したガスのうち爆発に寄与するガスの割合であり、通常 0.1 (10%) が用いられる。また、TNT 収率 γ は爆発に寄与したガスの総エネルギーと、この場合に生じた爆風圧に相当する TNT 当量のエネルギーの割合であり、通常安全側の評価を見込んで 0.064 (6.4%) が用いられる。

換算距離 λ は、図 7 により爆風圧 (Pa) と対応する。この図の換算距離 (λ) と爆風圧 (P) との関係は次のような近似式で表すことができる (ただし爆風圧の単位は kgf/cm²)ⁱ

- $P < 0.035$: $\lambda = 2.7944 P^{-0.71448}$
- $0.035 \leq P < 0.2$: $\lambda = 2.4311 P^{-0.75698}$
- $0.2 \leq P < 0.65$: $\lambda = 3.143 P^{-0.59261}$
- $P \geq 0.65$: $\lambda = 3.2781 P^{-0.48551}$

ⁱ 安全工学協会編：安全工学講座 2・爆発，1983



換算距離 $\lambda = R / W_{TNT}^{1/3}$ (m/kg^{1/3})

図7 換算距離 λ と爆風圧との関係ⁱ

なお、高圧ガス保安法では、式 22 を次式のように表し、Kの値をガスの種類ごとに示している（燃焼熱量の単位を kcal/kg で表しており Q_{TNT} は 1,000kcal/kg としている。またK値に 10^3 が掛かるのは W_G をトンで表しているためである）。

ⁱ 石油コンビナート防災診断委員会：石油コンビナート災害想定の手法(消防地第 180 号), 1980

$$L = 0.04 \lambda \sqrt[3]{K W_G} \quad (式 23)$$

$$K = f \psi Q_G \times 10^3$$

この式では、TNT 当量を次のように見積もっていることになる。

$$W_{TNT} = \frac{0.064 K W_G}{1000} \quad (式 24)$$

同法では、既存施設に対しては $\lambda=12.0$ (爆風圧 11.76kPa)、新規施設に対しては $\lambda=14.4$ (爆風圧 9.8kPa) を限界強度として保安距離を確保するものとしている。

TNT 等価法は簡易に爆風圧を推定することができるが、開放空間における爆轟を前提としており、現実的にはほとんど起こり得ない現象であると指摘されているⁱ。また、計算値と実測値とを比較した結果によれば、爆轟を起こしているものについてはほぼ一致しているが、爆燃していると考えられるものについては過大評価であるとの報告があるⁱⁱ。

(3) ファイヤーボール

蒸気雲爆発にはファイヤーボールを伴うことがある。特に、東日本大震災での事例で見られたように、LPG タンクが BLEVE により破損した場合には、巨大なファイヤーボールが形成され、主に放射熱によって周囲に大きな影響を与える恐れがある。

ア. 直径・継続時間

ファイヤーボールの直径と継続時間に関する算定式はいくつか提案されているものがあるが、消防庁指針 (2001) にも示されている次式を用いる。

$$D = 3.77 \cdot W^{0.325}$$

$$t = 0.258 \cdot W^{0.349} \quad (式 25)$$

ここで、

D : ファイヤーボール直径 (m)

t : 継続時間 (s)

W : 燃焼ガス量 (可燃性ガス量と理論酸素量の和 : kg)

また、ファイヤーボール中心の高さ (H) は次式により与えられる。

$$H = 0.75 \cdot D \quad (式 26)$$

ⁱ CCPS AIChE : Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2000

ⁱⁱ 土橋律,川村智史,桑名一徳,中山良男 : ガス爆発時の爆風圧の影響度評価, 安全工学セミナー講演予稿集, 2009

イ. 放射熱

ファイヤーボールから受ける放射熱は、ステファン・ボルツマンの法則に基づいた次式で表される。

$$E = \phi R_f = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{式 27})$$

ここで、

E : ファイヤーボールから受ける放射熱 (W/m²)

R_f : ファイヤーボールが発散する放射熱 (= $\varepsilon \sigma T^4$: W/m²)

T : ファイヤーボールの温度 (K)

σ : ステファン・ボルツマン定数 (= 5.67×10^{-8} W/m²K⁴)

ε : 放射率

ϕ : 形態係数

形態係数 ϕ は、ファイヤーボールを球形と仮定し、球の中心に正対した受熱面を想定すると次式で表される。

$$\phi = \left(\frac{D}{2L} \right)^2 \quad (\text{式 28})$$

ただし、

D : ファイヤーボール直径 (m)

L : ファイヤーボール中心から受熱面までの距離 (m)

式 27 で、ファイヤーボールを 1750K の完全黒体 ($\varepsilon = 1.0$) とし、形態係数として式 28 を代入すると次のようになる。

$$E = 1.33 \times 10^5 \left(\frac{D}{L} \right)^2 \quad (\text{式 29})$$

(4) フラッシュ火災

フラッシュ火災とは、可燃性蒸気雲の燃焼で火炎伝播速度が比較的遅く過圧が無視できるものをいう。この場合、爆風圧よりも放射熱が問題になるが、放射熱の影響を算定するためのモデルはほとんど開発されていない。そのため、燃焼プロセスが穏やかで持続時間が短いこと、ガス雲の熱膨張は浮力により鉛直上方に起こることを仮定して、ガス濃度が爆発下限界の 1/2 以上となる範囲を基準として評価することが一般的である。

(5) 容器破裂

圧力上昇に伴う容器等の破裂に関しては、破裂前後の圧力の違いから放出エネルギーを計算し、これと等価な TNT 火薬量 (TNT 当量) を求めて、式 20 によりある地点の爆風圧を推定すること

ができる。破裂の際に放出されるエネルギーを求める式としては次のものがあるⁱ。

① Brode の式 (1959)

$$E = \left(\frac{P - P_0}{\gamma - 1} \right) V \quad (\text{式 30})$$

② Crowl の式 (1992)

$$E = PV \left[\ln \left(\frac{P}{P_0} \right) - \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \right] \quad (\text{式 31})$$

ここで、

E : 破裂により放出されるエネルギー (J)

P : 破裂前の容器内圧力 (絶対圧 : Pa)

P₀ : 破裂後の圧力 (=0.101 MPa=0.101×10⁶ Pa)

V : 内容積 (m³)

γ : 容器内の気体の比熱比

タンクの破裂を前提とした場合、タンク気相部の容積が大きい (タンク貯蔵量が少ない) ほど爆風圧の推定値は大きくなり、蒸気雲爆発を前提とした場合と逆の傾向を示す。また、推定値は貯蔵量が相当に少ない場合を除いて、蒸気雲爆発を前提としたほうが大きくなり安全側の評価といえよう。

(6) 飛散物

容器の破裂による破片の飛散範囲は、破裂エネルギーのほか、破片の数、重量や形状、射出角度や初速度により異なってくる。文献 i) には飛散物に関するいくつかの推定式が示されているが、防災アセスメントのような事前評価において、これらの飛散条件を考慮して評価を行うことは事実上困難といえる。ただし、LPG 容器 (円筒形) の BLEVE に伴う破片の飛散範囲に関しては、次のような簡易式が示されているⁱ。

$$\begin{aligned} L &= 90 M^{0.333} \quad (\text{容積 } 5\text{m}^3 \text{ 未満の容器}) \\ &= 465 M^{0.10} \quad (\text{容積 } 5\text{m}^3 \text{ 以上の容器}) \end{aligned} \quad (\text{式 32})$$

ただし、

L : 破片の最大飛散範囲(m)

M : 破裂時の貯蔵物質量(kg)

ⁱ CCPS AIChE : Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards Second Edition, 2010

資料3 対象地域の気象条件

評価施設においてガスの漏洩が生じると、ガスは大気中を風下方向に拡散するが、その時の拡散ガスの濃度分布は、風向や風速、大気安定度といった気象条件に影響される。本資料では、千葉県の大気環境常時測定局における過去10年間の気象観測データに基づき、ガス拡散解析にあたって適用する気象条件を検討する。表1及び図1に、対象地域周辺の気象観測所と収集した観測データを示す。

なお、災害の影響度の評価にあたっては、風向の頻度分布を考慮せず、全方向にガスが拡散する可能性があるものとする（風下方向への最大影響距離を半径とした円内を影響範囲とする）。

表1 対象地域周辺の気象観測所と観測データ

観測所名称	所在地	風向		風速			全天日射量	
		データの有無	観測単位	データの有無	観測単位	風速計高さ	データの有無	観測単位
市川二俣	市川市二俣678	有り	16方位	有り	0.1m/s	20m	無し	—
船橋若松	船橋市若松3-2-3	有り	16方位	有り	0.1m/s	10m	無し	—
千葉千葉港	中央区千葉港1-1	有り	16方位	有り	0.1m/s	18m	無し	—
市原岩崎西	市原市岩崎西1-8-8	有り	16方位	有り	0.1m/s	21m	有り	0.01MJ/m2
袖ヶ浦長浦	袖ヶ浦市長浦駅前6-1-4	有り	16方位	有り	0.1m/s	10m	無し	—
君津坂田	君津市坂田518	有り	16方位	有り	0.1m/s	9m	無し	—



図1 気象観測所の位置（千葉県大気環境常時測定局）

(1) 風向・風速

表 2 及び図 2 に過去 10 年間の最多出現風向及び平均風速を示す。

風速については、観測所によって風速計の設置高さが異なるため、次式により 10m 高さにおける風速に換算している。

$$\text{換算風速} = \text{測定した風速} \times (10 / \text{風速計の高さ})^{0.25} \text{ }^i$$

表 2 最多出現風向及び平均風速 (2004.4.1~2014.3.31)

特別防災区域	観測所名	風向(最多出現)	平均風速(m/s) *10m 高さ換算
京葉臨海北部	市川二俣	北	2.5
京葉臨海北部	船橋若松	北北東	1.9
京葉臨海中部	千葉千葉港	北東	1.9
京葉臨海中部	市原岩崎西	北	2.9
京葉臨海中部	袖ヶ浦長浦	東南東	2.4
京葉臨海南部	君津坂田	北北東	1.8

[市川二俣]

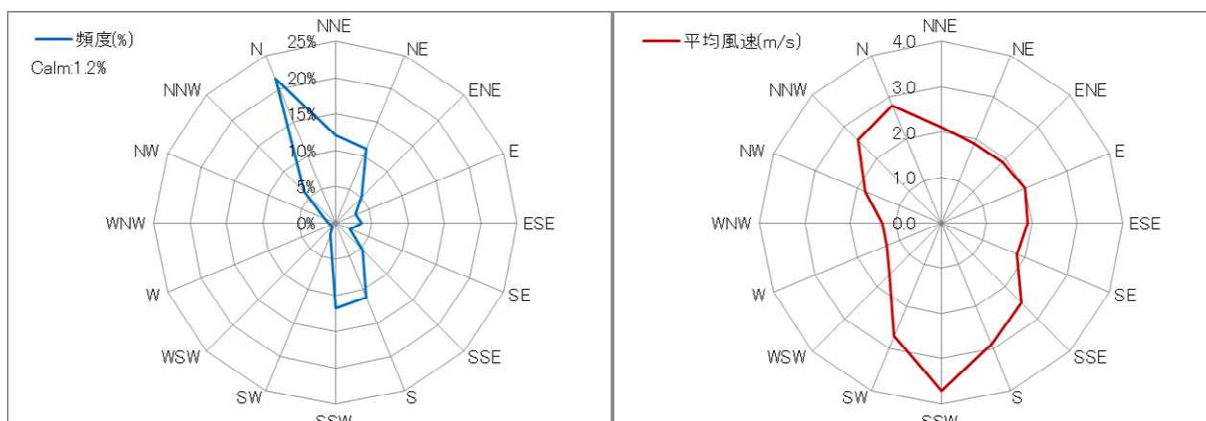
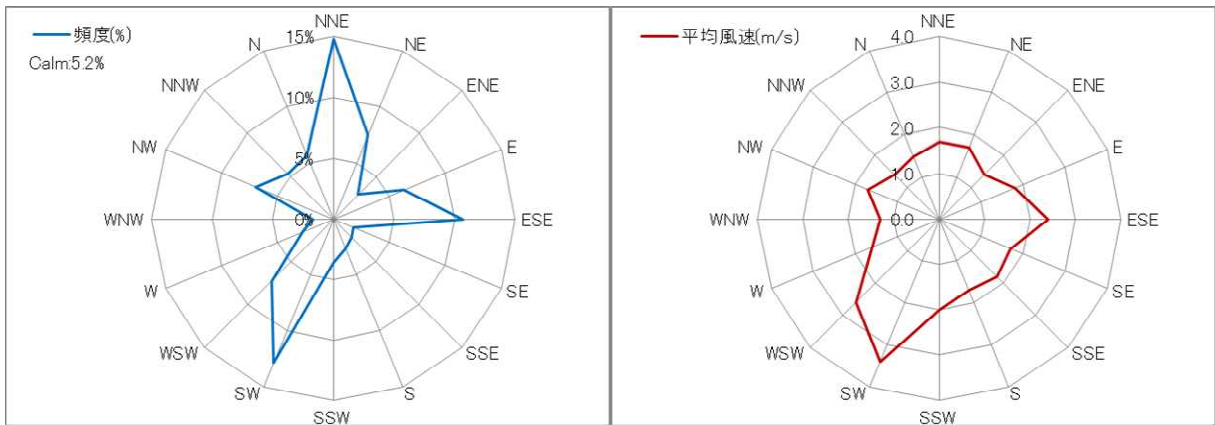


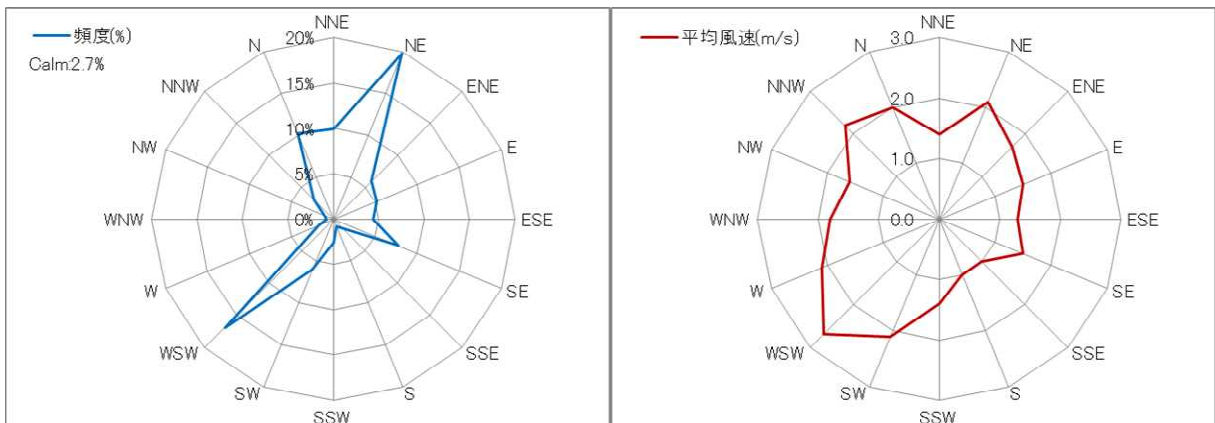
図 2 風配図 (2004.4.1~2014.3.31)

ⁱ U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY: USER'S GUIDE FOR THE INDUSTRIAL SOURCE COMPLEX (ISC3) DISPERSION MODELS VOLUME II - DESCRIPTION OF MODEL ALGORITHMS, 1995

[船橋若松]



[千葉千葉港]



[市原岩崎西]

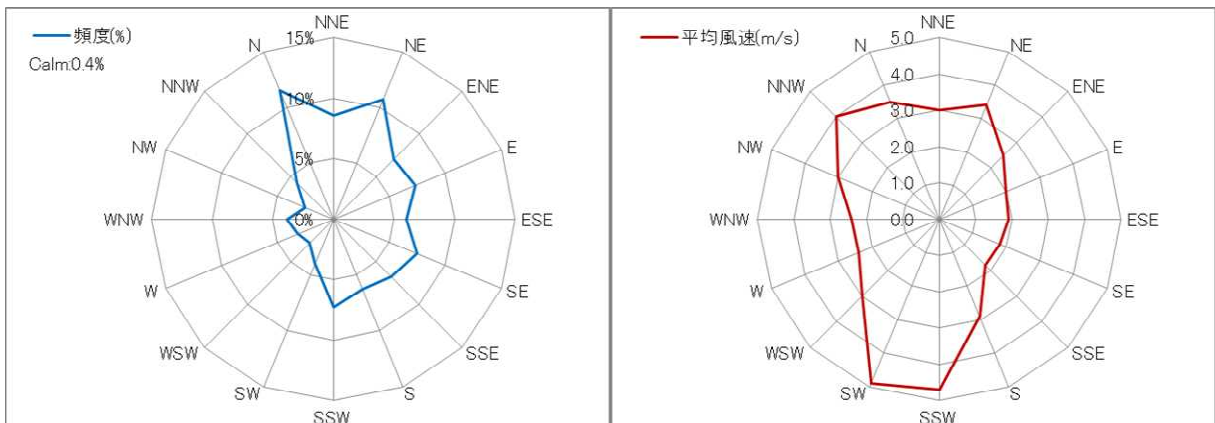
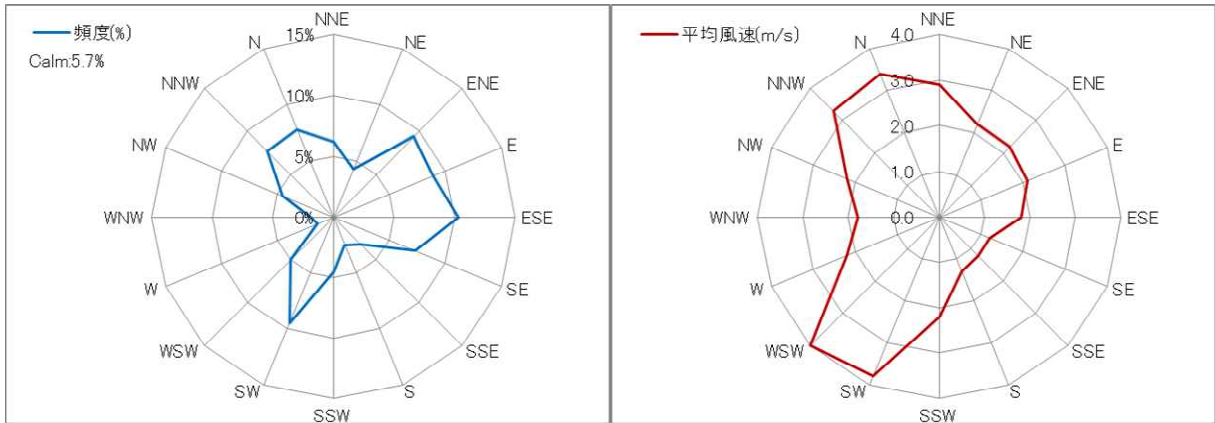


図2 風配図 (2004.4.1~2014.3.31) (続き)

[袖ヶ浦長浦]



[君津坂田]

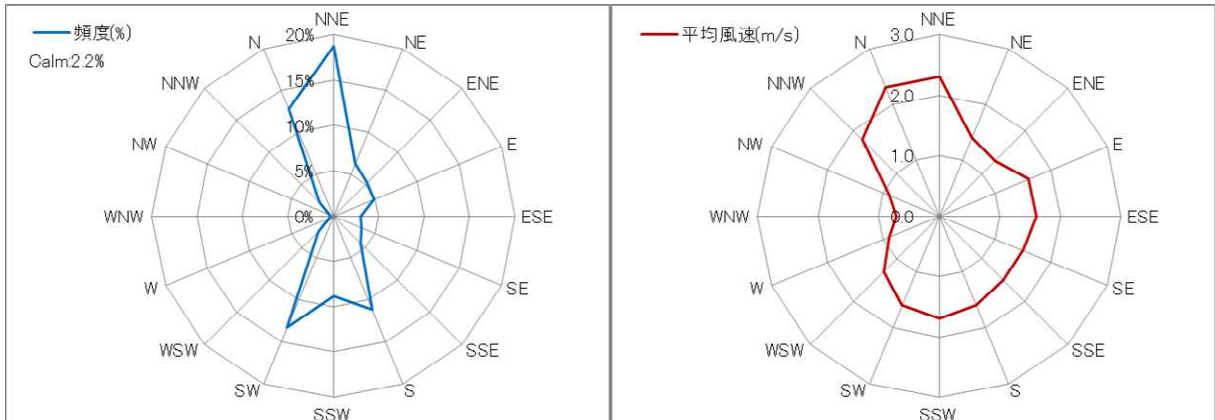


図 2 風配図 (2004.4.1~2014.3.31) (続き)

(2) 大気安定度

大気安定度とは大気の状態を表す指標で、「不安定」「やや不安定」「中立」「安定」の4つの階級で表す。一般に、大気が不安定な状態ではガスがよく拡散されることから、ガス雲の幅は広くなり最大到達距離は短くなる。逆に大気が安定な状態ではガスがほとんど拡散されず、ガス雲の幅は狭く最大到達距離は長くなる。

大気安定度は風速及び日射量データから表3により求められる。対象地域周辺では、市原岩崎西において日射量の観測を行っていることから、当該観測所局における過去10年間の観測データを用いて大気安定度を求める。

表4に日射量の平均値及び最多出現となる大気安定度を、図3に大気安定度分布を示す。

表 3 大気安定度階級表ⁱ

風速U (m/s)	全天日射量 Q(MJ/m ²):1時間の積算値				
	夜間 (Q=0)	日中			
		Q<0.54	0.54≤Q<1.08	1.08≤Q<2.16	2.16≤Q
U<2.0	安定	中立	不安定	不安定	不安定
U<3.0	安定	中立	やや不安定	不安定	不安定
U<4.0	中立	中立	やや不安定	不安定	不安定
U<6.0	中立	中立	中立	やや不安定	やや不安定
6.0≤U	中立	中立	中立	中立	やや不安定

不安定: 風が弱く日照りの時に現れる状態。地表付近が高温で上空が低温という気温の鉛直分布が出現するため、対流がよく起こる。

やや不安定: 不安定と中立の中間の状態。

中立: 曇りや風の強い場合などに現れる状態。この場合は、周囲との温度差がないため、上下方向の動きは起きない。

安定: 風が弱く良く晴れた夜間などに現れる、放射冷却が進んだ状態。気温分布が不安定型とは逆になって、対流がほとんど起こらない。

表 4 全天日射量及び大気安定度 (2004.4.1~2014.3.31)

観測所名	全天日射量(日合計) の平均(MJ/m ²)	大気安定度 (最多出現)
市原岩崎西	12.4	中立

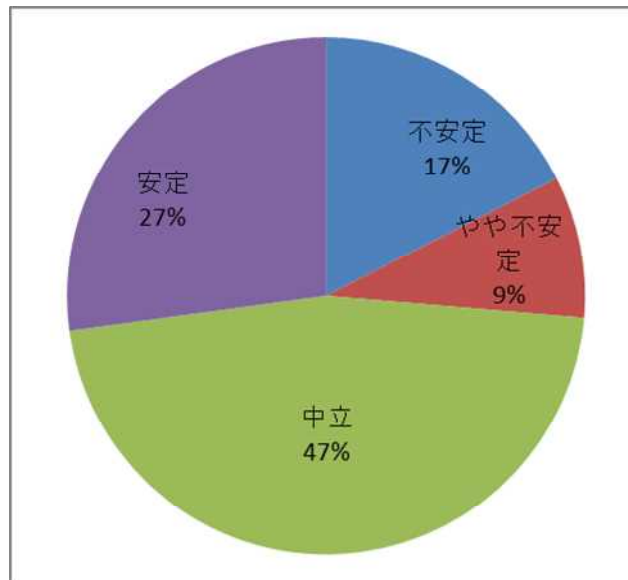


図 3 大気安定度分布 (2004.4.1~2014.3.31、市原岩崎西)

ⁱ 関東経済産業局：有害大気汚染物質に係る発生源周辺における環境影響予測手法マニュアル（経済産業省－低煙源工場拡散モデル：METI-LIS），2001

(3) ガス拡散解析に適用する気象条件

ガス拡散の算定に用いる風速は、特別防災区域ごとに設定する。

コンビナートは沿岸部に立地することから、風速については内陸部に位置する観測点よりも、沿岸部の観測点のデータを用いることが望ましい。また、ある濃度のガスの拡散距離は、風速が小さいほど大きく算定されることから（「災害影響の算定手法」式 7）、より小さい値を用いる方が安全側に立った評価となる。

大気安定度については、対象地域周辺において日射量の観測を行っている観測所が市原岩崎西であることから、当該観測所局における大気安定度を用いる。

以上より、ガス拡散の算定に用いる気象条件は表 5 のとおりとする。

表 5 ガス拡散の算定に用いる気象条件

特別防災区域	観測所名	風速(m/s)	大気安定度
京葉臨海北部	船橋若松	1.9	中立
京葉臨海中部	千葉千葉港	1.9	中立
京葉臨海南部	君津坂田	1.8	中立

資料4 千葉県地震被害想定調査による液状化の予測手法

千葉県地震被害想定調査(平成26~27年度)ⁱでは、液状化予測手法として、道路橋示方書(2012)ⁱⁱの方法に準じた F_L 法およびこれを深度方向に重み付けして積分した P_L 法を用い、千葉県北西部直下地震及び大正型関東地震について予測を行っている。

さらに、全県で同一の震度の揺れが発生した場合にどのような範囲で液状化が発生するかの目安とすることを目的として、東北地方太平洋沖地震のような巨大地震と直下地震の2種類の地震を想定し、震度5弱、5強、6弱、6強の場合について液状化しやすさマップを作成している。

液状化予測手法は以下のとおりである。

(1) F_L 法

F_L 法とは、検討対象とする地盤の液状化対象層を抽出し、液状化対象層それぞれについて、液状化に対する抵抗力と地震力の強さを比較し、液状化に対する抵抗率 (F_L 値) を求める手法である。

1) F_L 値

F_L 値は、次式で与えられる。

$$F_L = R/L \quad \text{———— (1)}$$

ここで、 R : 液状化抵抗比

L : 繰り返しせん断応力

F_L 値が1.0を下回る層については、液状化するものと見なす。

2) 液状化抵抗比 R の求め方

液状化抵抗比 R は、以下の式により与えられる。

$$R = c_w R_L \quad \text{———— (2)}$$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} \quad (N_a < 14)$$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} + 1.6 \cdot 10^{-6} (N_a - 14)^{4.5} \quad (14 \leq N_a)$$

ここで、

<砂質土の場合>

$$R = c_w R_L$$

$$N_a = c_1 \cdot N_1 + c_2$$

$$N_1 = 1.7 \cdot N / (\delta_v' + 0.7)$$

$$c_1 = 1 \quad (0\% \leq FC < 10\%)$$

$$c_1 = (FC + 40)/50 \quad (10\% \leq FC < 60\%)$$

$$c_1 = FC/20 - 1 \quad (60\% \leq FC)$$

$$c_2 = 0 \quad (0\% \leq FC < 10\%)$$

$$c_2 = (FC - 10)/18 \quad (10\% \leq FC)$$

<礫質土の場合>

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\}$$

ここに、

R : 動的せん断強度比

c_w : 地震動特性による補正係数

R_L : 繰返し三軸強度比

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N_1 : 有効上載圧 1kgf/cm^2 相当に換算した N 値

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

c_1, c_2 : 細粒分含有率による N 値の補正係数

FC : 細粒分含有率(%) (粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の土粒子の通過質量百分率)

D_{50} : 平均粒径(mm)

(タイプ I の地震動の場合)

$$c_w = 1.0$$

(タイプ II の地震動の場合)

$$c_w = 1.0 \quad (R_L \leq 0.1)$$

$$c_w = 3.3R_L + 0.67 \quad (0.1 < R_L \leq 0.4)$$

$$c_w = 2.0 \quad (0.4 < R_L)$$

(長継続時間の地震動の場合)

$$c_w = 0.8 \quad (\text{千葉県(2012)による})$$

※1) タイプ I : 大きな振幅が長時間繰返して作用する地震動 (プレート境界型の大規模な地震) を表したものである。

※2) タイプ II : 地震動は継続時間は短いが極めて強度を有する地震動 (兵庫県南部地震のような内陸型地震) を表したものである。

※3) 長継続時間の地震 : 大きな振幅がタイプ I よりも極めて長い時間繰返して作用する地震動 (東北地方太平洋沖地震のような超大規模な地震) を表したものである。

3) 繰返しせん断強度 L の求め方

繰返しせん断強度 L は、地表加速度から以下の換算式を用いて求める。

$$L = r_d \cdot \alpha / g \cdot \sigma_v / \sigma'_v \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x$$

$$\sigma_v = \{\gamma_{t1} h_w + \gamma_{t2} (x - h_w)\} / 10$$

$$\sigma'_v = \{\gamma'_{t1} h_w + \gamma'_{t2} (x - h_w)\} / 10$$

ここに、

L : 地震時せん断応力比

r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

α : 地表面最大加速度 (gal)

g : 重力加速度 (980gal)

σ_v : 全上載圧 (kgf/cm²)

σ'_v : 有効項載圧 (kgf/cm²)

x : 地表面からの深さ (m)

γ_{t1} : 地下水位面より浅い位置での土の単位体積重量 (tf/m³)

γ_{t2} : 地下水位面より深い位置での土の単位体積重量 (tf/m³)

γ'_{t2} : 地下水位面より深い位置での土の有効単位体積重量 (tf/m³)

h_w : 地下水位の深さ (m)

(2) P_L 法

道路橋示方書(2012)に示された手順に従って、各深度での F_L 値を算出し、その値を深さ方向に重みをつけて足し合わせ、地点での液状化可能性を表す P_L 値を算出し、この P_L 値によって液状化可能性判定を行う。液状化可能性判定は、岩崎ら(1980)ⁱⁱⁱによる図1及び表1に示すような関係により判定を行う。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x) dx \quad \text{-----} \quad (4)$$

ここに、

P_L : 液状化指数

F_L : 液状化に対する抵抗率

x : 地表面からの深さ (m)

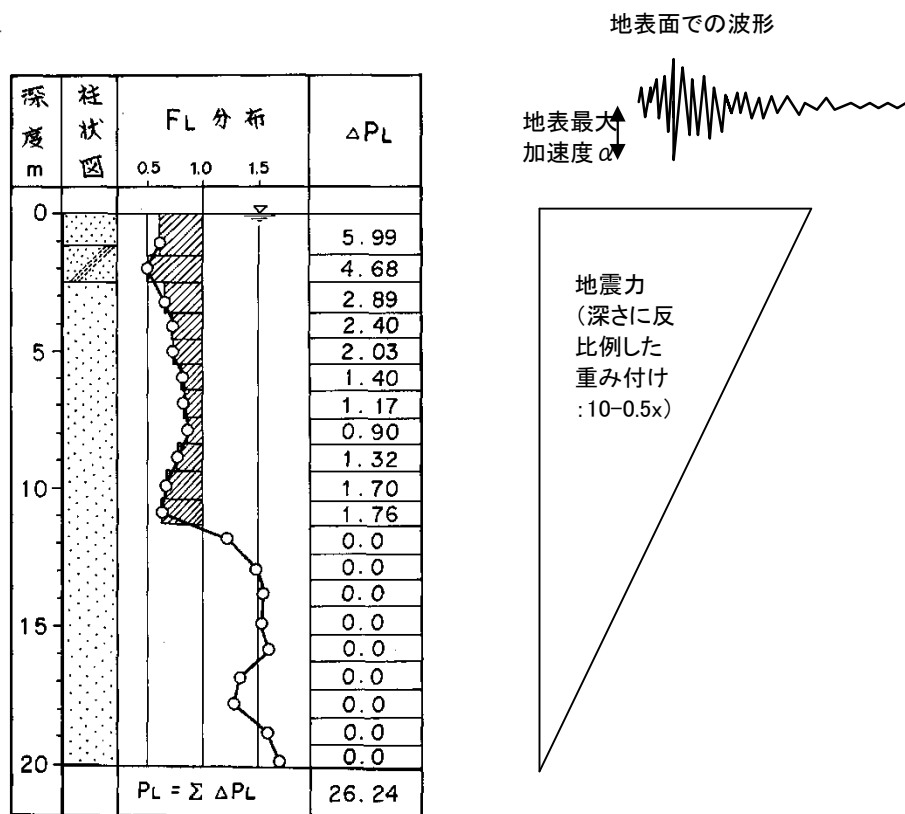


図1 PL 値の概念図 (岩崎ほか (1980) に加筆)

表1 PL 値による液状化可能性判定区分 (岩崎ほか (1980) に加筆修正)

	PL=0	0 < PL ≤ 5	5 < PL ≤ 15	PL > 15
PL値による液状化可能性判定	液状化可能性は極めて低い。液状化に関する詳細な調査は不要	液状化可能性は低い。特に重要な構造物に対して、より詳細な調査が必要	液状化可能性がやや高い。重要な構造物に対してはより詳細な調査が必要。液状化対策が一般には必要	液状化可能性が高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避

ⁱ 千葉県：千葉県地震被害想定調査 (平成 26~27 年度), 2015

ⁱⁱ 日本道路協会 (2012)：道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 平成 24 年 3 月

ⁱⁱⁱ 岩崎敏男、龍岡文夫、常田賢一、安田 進 (1980)：地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol.28, No.4, 23-29.

資料5 計測震度の算出方法（気象庁）ⁱ

計測震度は、震度計内部で以下のようなデジタル処理によって計算される。

1. デジタル加速度記録3成分（水平動2成分、上下動1成分）のそれぞれのフーリエ変換を求める。
2. 地震波の周期による影響を補正するフィルター（図1）を掛ける。
3. 逆フーリエ変換を行い、時刻歴の波形に戻す。
4. 得られたフィルター処理済みの記録3成分の波形をベクトル的に合成をする。
5. ベクトル波形の絶対値がある値 a 以上となる時間の合計を計算したとき、これがちょうど 0.3秒となるような a を求める。
6. 5で求めた a を、 $I = 2 \log a + 0.94$ により計測震度 I を計算する。計算された I の小数第3位を四捨五入し、小数第2位を切り捨てたものを計測震度とする。

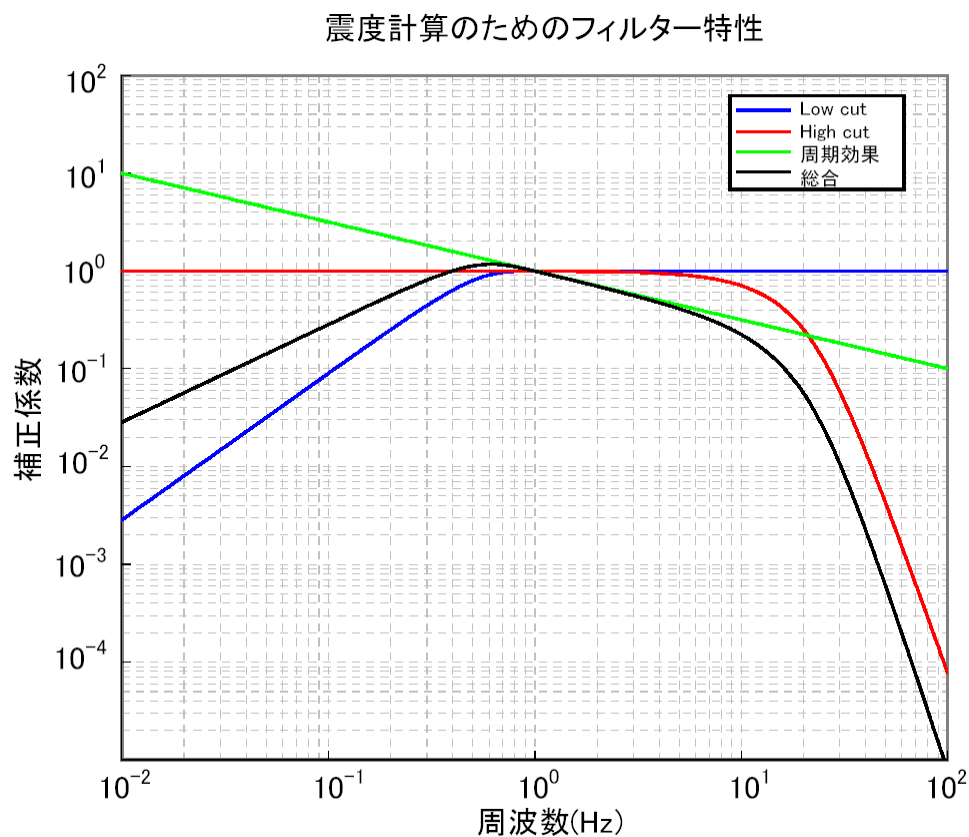


図1 震度計算のためのフィルター特性

ⁱ 気象庁ホームページ

資料6 長柱座屈防止対策について

2007年7月に発生した新潟県中越沖地震において、ガス事業法に基づくガス導管事業者の高圧ガス導管2ヶ所において、小口径導管の長柱座屈が生じた。長柱座屈とは、「長い柱状の構造物（小口径の鋼管等）の管軸方向に大きな力を加えると、特定の力を境に急激に不可逆的に大きなたわみを生ずる現象」である。

この被害の発生を受け、経済産業省は、平成20年度から3ヶ年にわたり、長柱座屈の発生メカニズムの解明及び大地震の際にも長柱座屈が容易に生じない設計手法等の検討を行っている。

調査結果の概要は以下の通りである。

【長柱座屈防止に係る調査結果】ⁱ

(1) 平成20年度

地震動の影響を受ける直線状の導管の長柱座屈解析において、「部分解析モデル」を採用し、ケーススタディとして実際に長柱座屈被害を受けた高圧導管の事例を解析した結果、よい精度で被害状況が再現されていることが確認された。また、長柱座屈には、導管の口径、材料特性、直線区間長、管軸直角方向の地盤ばね特性、地盤固有周期が影響していることが確認された。

(2) 平成21年度

平成20年度に考案された数値解析手法を検証するため、導管の口径、材料特性、管軸直角方向の地盤ばね特性の条件を変えて、実際の管による圧縮曲げ実験、土槽実験及びフィールド実験を実施した結果、本数値解析手法が長柱座屈の解析に適用できること、また、口径が大きいほど、地盤が固いほど、また降伏棚の短い材料ほど長柱座屈が生じにくいことが確認された。

(3) 平成22年度

平成21年度に検証された数値解析手法を用いて、各種条件において長柱座屈により漏えいを容易に発生させない直線区間の長さの上限値の検討を行うとともに、これまでに得られた調査結果を基に、長柱座屈被害防止のための具体的な設計手法に関するガイドライン案を作成した。(H23.2)

【長柱座屈防止のための耐震設計指針】ⁱⁱ

上記の調査結果を踏まえ、平成23年8月に「長柱座屈防止のための耐震設計指針」が策定されている。指針において耐震設計の対象とされるガス導管は「埋設される100A以下の供給上重要な溶接接合された高・中圧ガス導管」であり、埋設する地盤の固有周期、管種、呼び径等に応じて、直線長の上限値が規定されている。

【参考文献】

JFE エンジニアリング株式会社：平成22年度地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査（次

ⁱ 経済産業省原子力安全・保安院ガス安全課：「地震対策技術調査事業」の進捗状況について，2010

ⁱⁱ 日本ガス協会：長柱座屈防止のための耐震設計指針，2013

世代保安向上技術調査（地震対策技術調査（長柱座屈開始以降における小口径管の長柱座屈対応策の検討））報告書，平成 23 年 2 月

資料7 応答スペクトルの概念

図1は、応答スペクトルの求め方を模式的に示したものである。

1枚の台の上に、固有周期がそれぞれ1秒、1.5秒、2秒の3種類の振子が並んでいる(a)。この台をある地震動の加速度どおりにゆすってみると、振子は台の動きに応じて揺れる。つまり、地震動に対して応答を示す。

各振子の応答加速度を記録したものが(b)の応答加速度波形であり、横軸は時間を、縦軸は加速度の大きさを表す。振子は各々の固有周期を持っているので揺れ方が異なり、固有周期の短い振子は速く揺れ、長周期の振子はゆっくり揺れる。

次に、これらの波形から応答加速度の最大値を探し、それぞれの値が S_1 、 S_2 、 S_3 だったとする。横軸に振子の固有周期、縦軸に応答加速度の最大値をとると、(c)の図ようになる。もし異なる固有周期を持つ非常に多くの振子の最大応答加速度を調べ、プロットしたとすると同図の曲線のようになる筈であり、この曲線が加速度応答スペクトルである。

図1の場合は振子に働く加速度を測定したが、速度や変位を測れば同様な操作によって速度応答スペクトルや変位応答スペクトルが求められる。

(大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門(1994)をもとに改変)

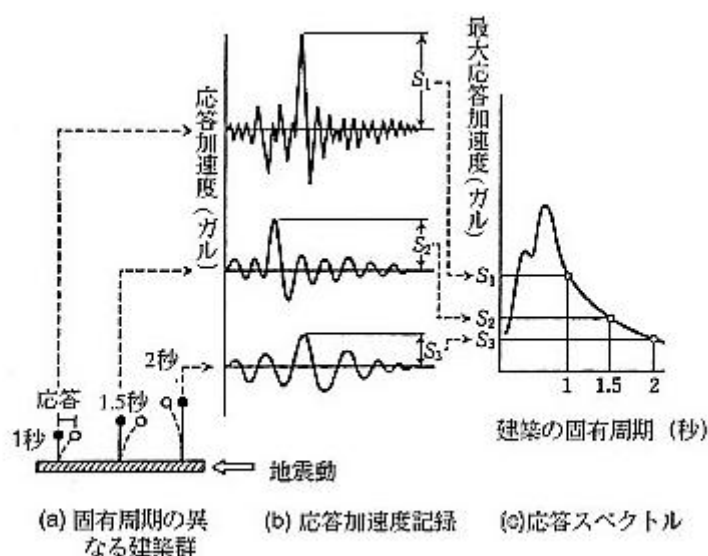


図1 応答スペクトルの求め方 [大崎(1987)による]

資料8 石油タンクのスロッシングによる溢流量の算定手法

危険物タンクのスロッシング最大波高の推定には、速度応答スペクトル法ⁱ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。ただし、速度応答スペクトル法は微小波高を仮定したものであり、溢流が生じるような大きなスロッシングの場合には、非線形性の影響を考慮する必要がある。西らⁱⁱは振動台による模型タンクの揺動実験を行い、速度応答スペクトル法による線形解に非線形性を考慮した補正値を導入し、溢流高さⁱⁱⁱと溢流量の関係を実験的に求めている。

1 スロッシングの非線形性を考慮した最大波高の推定

非線形性を考慮したスロッシング最大波高は、式(1)により表される。

$$\eta^+ = \eta^{(1)\max} + \Delta\eta \dots\dots\dots (1)$$

η^+ : 非線形性を考慮したスロッシング最大波高

$\eta^{(1)\max}$: 速度応答スペクトル法に基づくスロッシング最大波高(線形解)

$\Delta\eta$: 非線形液面増分

$\Delta\eta$ は、直径 7.6m の模型タンクによる振動実験に基づき、式(2)のように表される。

$$\Delta\eta = 0.91 \cdot R \cdot \left(\frac{\eta_{\max}^{(1)}}{R} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

R : タンク半径

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)、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。溢流体積(δv)が式(3)で表されるとすると、 Δ 、 δv 、 δh は式(4)で表される関係がある。ここで、 r_0 は式(5)において $\eta^+(r_0, 0) = Hc$ を解いて求められ、 θ_0 は式(5)において $\eta^+(R, \theta_0) = Hc$ を解いて求められる。

$$\delta v = \delta h \cdot (R - r_0) \cdot R \theta_0 \dots\dots\dots (3)$$

δv : 溢流体積(図1の斜線で示す部分)

δh : 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 Hc と等しくなる円周方向角度

$$\frac{\Delta}{R} = \alpha \cdot \frac{\delta v}{R^3} = \alpha \cdot \frac{\delta h}{R} \cdot \frac{R - r_0}{R} \cdot \theta_0 \dots\dots\dots (4)$$

α : 比例係数(自由液面 : 0.659、浮屋根 : 0.4023)

$$\eta^+(r, \theta) = \eta_{\max}^{(1)} \cdot \frac{J_1(\varepsilon_1 \cdot \frac{r}{R})}{J_1(\varepsilon_1)} \cdot \cos \theta + \frac{r}{R} \cdot \Delta \eta \cdot \cos 2\theta \dots\dots\dots (5)$$

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)

従って、溢流量の推定値は式(6)により求められる。

$$\begin{aligned} \Delta v &= (R^2 \pi) \cdot \Delta \\ &= (R^2 \pi) \cdot (\alpha \cdot \delta v / R^2) \\ &= (R^2 \pi) \cdot (\alpha \cdot \delta h \cdot (R - r_0) \cdot \theta_0 / R) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

Δ : スロッシングによる液面減少高さ

α : 0.659 (自由液面)、0.4023 (浮屋根)

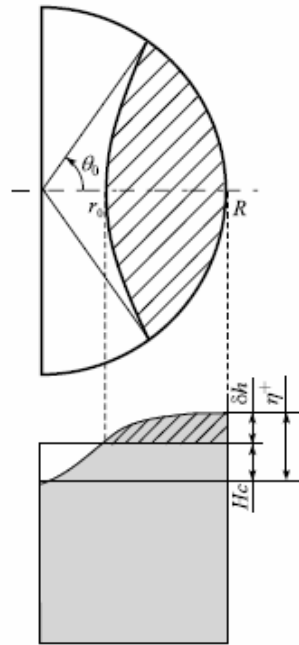


図1 非線形スロッシングによる溢流量の模式図 ii)

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年十勝沖地震に対して十分な適用性があることを確認している。また、1964年新潟地震での固定屋根式の重油タンクからの溢流(2万klタンクの約5%が溢流したとされる)について、自由液面を仮定して推定した溢流量は、実溢流量の70%程度となった。この原因として、推定に用いた速度応答スペクトルは水平1成分(EW方向)のみであることをあげ、水平2成分の地震記録を用いた場合には推定精度が高まると考察している。

なお、固定屋根式タンクからの溢流に自由液面を仮定した推定式を適用することについて、座間・他(2006)は、実際の溢流とは条件が異なるものの、適用できる可能性があることを示唆している。 iii

ⁱ 坂井藤一：円筒形液体タンクの耐震設計法に関する二,三の提案, 圧力技術, Vol18, No.4, 1980

ⁱⁱ 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, Vol.46, No.5, 2008

ⁱⁱⁱ 座間信作, 山田實, 西晴樹, 廣川幹浩, 平野廣和, 鈴木森晶：石油タンクのスロッシングによる内容液の溢流量の算定, 消防研究所報告, Vol.101, 2006

資料9 想定地震等の発生確率

地震調査研究推進本部地震調査委員会では、主要な活断層で発生する地震や海溝型地震を対象に、地震の規模や一定期間内に地震が発生する確率を予測、公表している（長期評価）。

地震調査委員会における長期評価手法は、東北地方太平洋沖地震の発生を受けて見直しが行われ、これまで考えられてきた固有地震モデル（地震がある頻度でほぼ同じ領域で同様の規模で発生すると仮定）に基づく評価ではなく、発生しうる最大クラスも含めた地震の多様性を考慮した評価が試みられている。

以下は、地震調査委員会による南海トラフ、相模トラフ沿い、三陸沖から房総沖で発生する地震の長期評価結果をまとめたものである。これらの地震は、東北地方太平洋沖地震の発生以降に、長期評価の見直しが行われている。

1 南海トラフで発生する地震（発生確率の算定基準日：2015.1.1）ⁱ

対象地震	今後 30 年以内の発生確率	今後 50 年以内の発生確率	平均発生間隔
南海トラフ（M8～M9 クラス）	70%程度	90%程度	88.2 年
（宝永地震(M8.6)クラス）	—	—	300～600 年
（最大(M9)クラス）	—	—	数千年以上と推定

注) 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）が必ずしも成立しないことが明らかとなっている。したがって、上記の地震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が、最大クラスの地震の発生頻度は 100～200 年の間隔で繰り返し起きている大地震に比べ、一桁以上低いと考えられている。

2 相模トラフ沿いの地震（発生確率の算定基準日：2015.1.1）ⁱⁱ

対象地震	今後 30 年以内の発生確率	今後 50 年以内の発生確率	平均発生間隔
M7 クラス（M6.7～M7.3）*	70%程度	80%程度	27.5 年
M8 クラス（M7.9～M8.6）	ほぼ 0～5%	ほぼ 0～10%	180～590 年程度
（元禄関東地震またはそれ以上）	（ほぼ 0%）	—	（約 2300 年）

*評価対象領域のどこかで地震が発生する確率

注) 房総半島南東沖の地震の震源断層は、元禄関東地震の震源域に含まれるが、大正関東地震の際に破壊されなかった房総半島の南東沖の領域である。単独で地震が発生した痕跡は見つかっていないため、地震発生可能性の評価はできないが、その可能性自体を否定しているわけではない。

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 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版），2014

3 三陸沖から房総沖にかけての地震（発生確率の算定基準日：2015.1.1）ⁱ

対象地震	今後 30 年以内 の発生確率	今後 50 年以内 の発生確率	平均発生間隔
三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート間地震（津波地震）(Mt8.6-Mt9.0)	30%程度	40%程度	103 年
（特定の海域）	（7%程度）	（10%程度）	（412 年）

注 1) 東北地方太平洋沖地震の震源域に含まれる三陸沖中部から三陸沖南部海溝寄りの海溝寄りに至る部分については、この地震によりこれまでの歪を解放した状態と考えられる。よって、この部分の将来の発生確率は上述の値より小さいと考えられる。

注 2) 房総沖の海溝寄りの部分では、1677 年 11 月の延宝房総沖地震の発生以来約 300 年間以上の空白期間がある。

ⁱ 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版），2011

資料 10 想定東海地震によるスロッシングの推定

本資料では、想定東海地震（地震調査研究推進本部、2009）ⁱを対象として、スロッシング最大波高の推定と、溢流が想定される場合の溢流量の推定を行う。

図 1 に想定東海地震の震源モデルを、図 2 に速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.5\%$ 、水平 2 成分の合成）を示す。

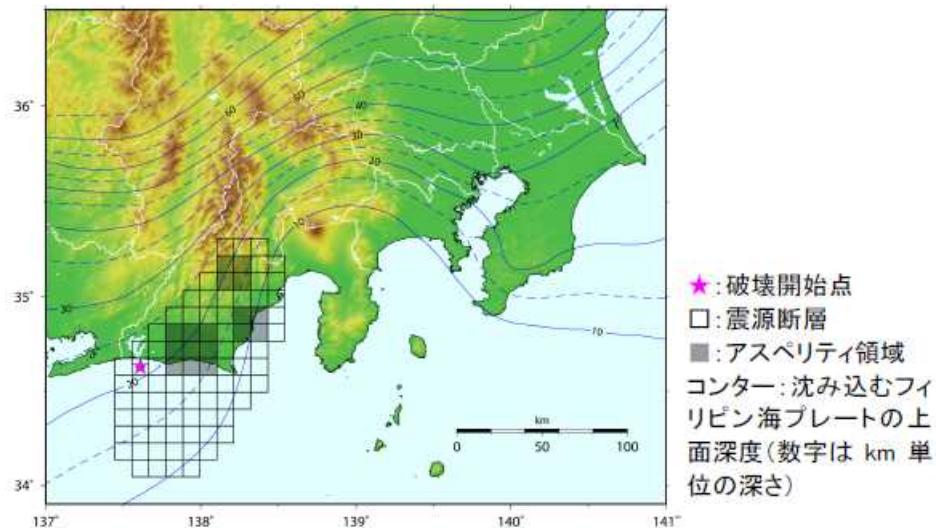


図 1 想定東海地震の長周期地震動予測地図のための震源モデルⁱ

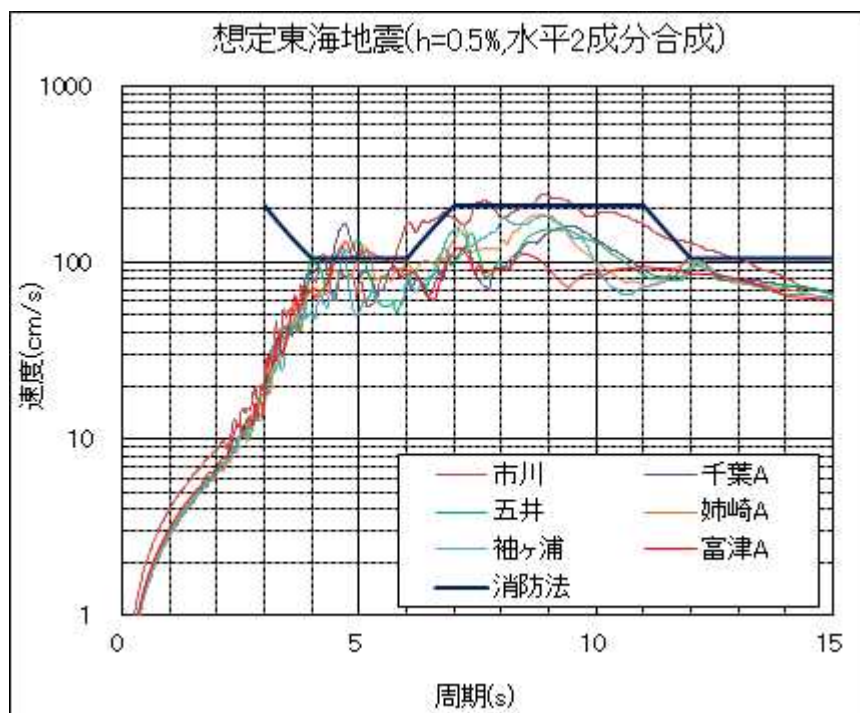


図 2 想定東海地震の速度応答スペクトル ($h=0.5\%$)

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

第4章に示した評価方法を用い、スロッシング最大波高の推定、溢流量の推定を行う。

表1及び図3~4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。

また、表1より、溢流が想定されるタンクのうち浮き屋根式タンク（計21基）を対象として、タンク満液時における最大溢流量を推定する。推定結果は図5に示す通りである。

表1 想定東海地震によるスロッシング最大波高（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) 浮き屋根について、S: シングルデッキ、D: ダブルデッキ

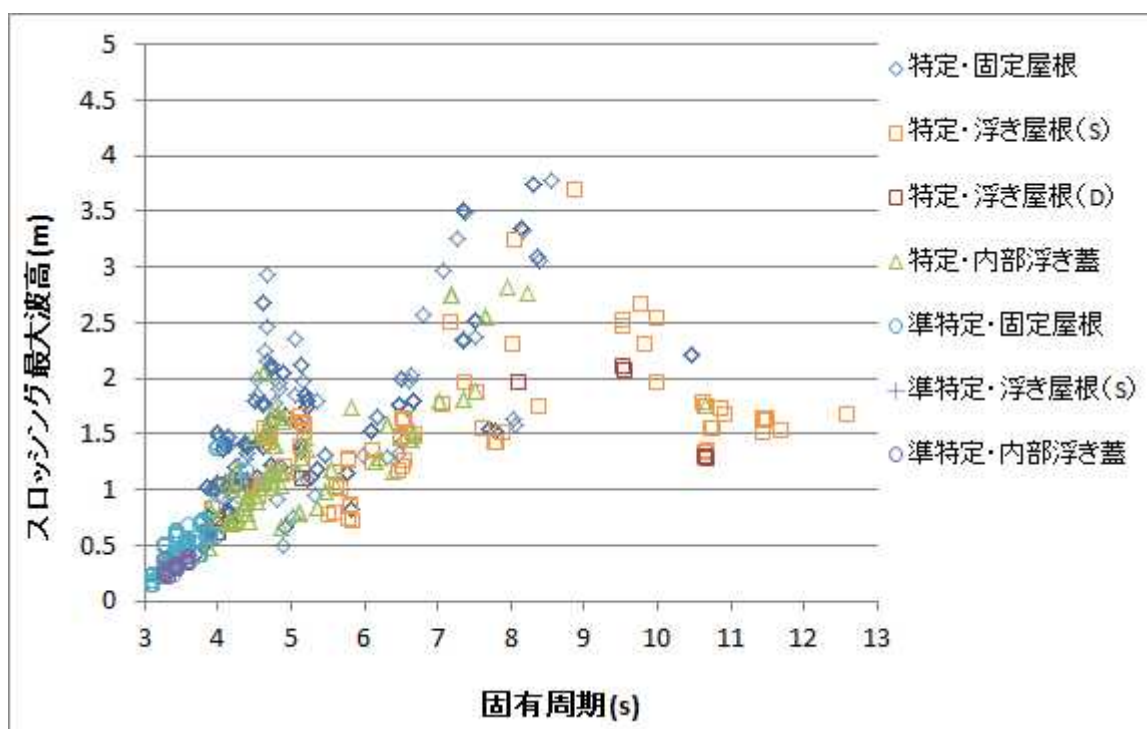


図3 スロッシング固有周期(1次)と最大波高（満液時）

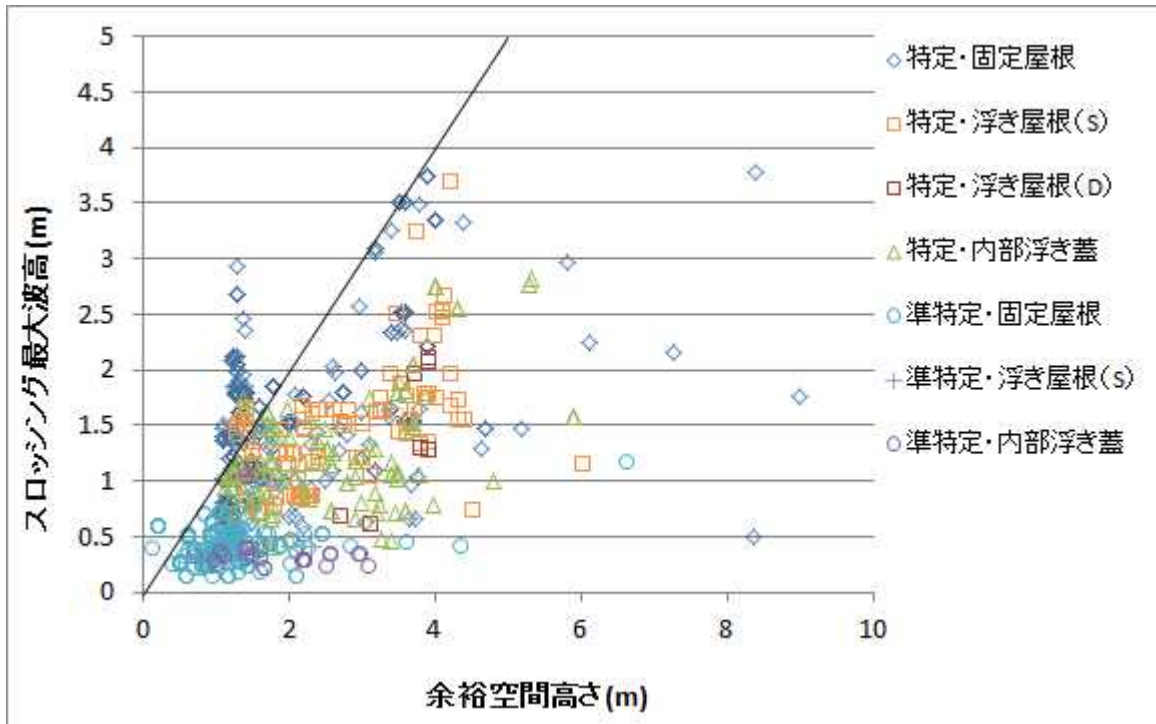


図4 タンク余裕空間高さとしロッシング最大波高 (満液時)

※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。

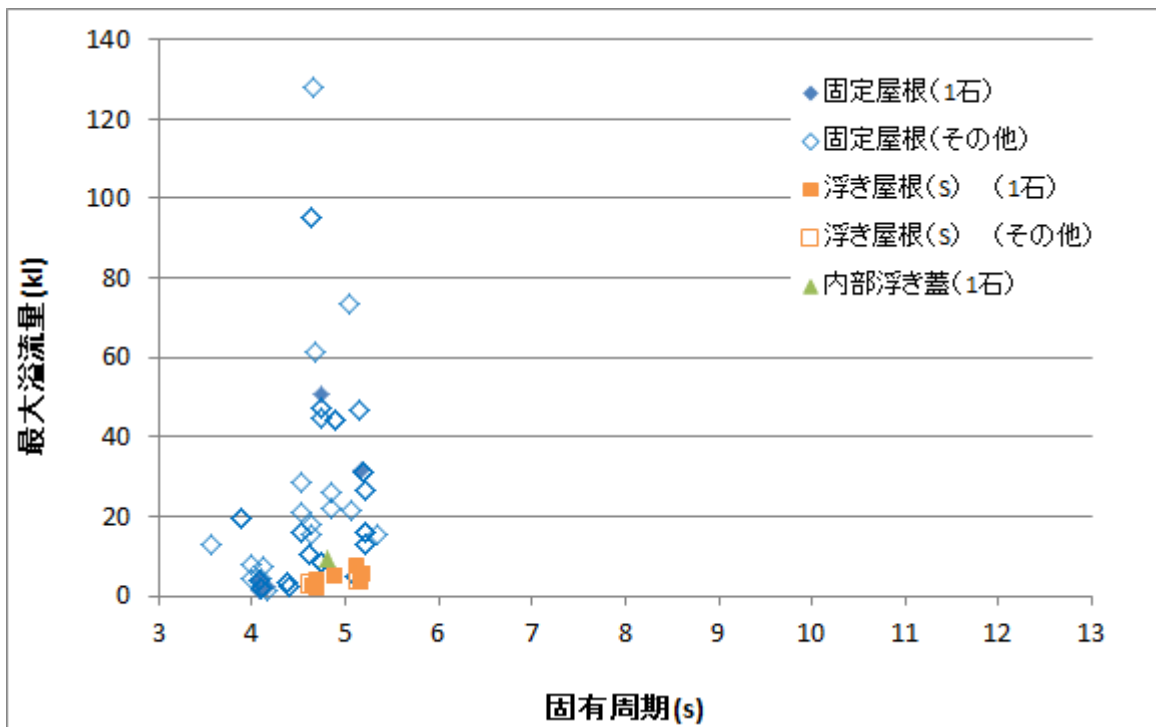


図5 浮き屋根式タンクの最大溢流量 (満液時)

注) 本資料で評価対象とした危険物タンクの諸元は、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以降の変更を反映したものである。

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