

## 危険物タンクの津波被害シミュレーションツール

(消防庁 石油コンビナートの防災アセスメント指針から抜粋)

## 参考資料 4 危険物タンクの津波被害シミュレーションツール

### 1. 危険物タンクの津波被害シミュレーションツールの提供

東日本大震災では、沿岸に立地する危険物タンクにおいて津波浸水被害が数多く発生した。これらの被害事例に関する詳細分析の結果、既往の津波波力による被害予測式の有効性が確認されたことから<sup>2)</sup>、消防庁ではこの予測式を用いた津波被害シミュレーションツールを開発・提供することとし、津波により浸水の恐れがある危険物タンクについては、具体的な被害予測に基づく津波対策を検証し、予防規程に盛り込むこととされた。このシミュレーションツールは、消防庁の以下のホームページからダウンロードすることができる。

#### ■屋外貯蔵タンクの津波被害シミュレーションツール

<http://www.fdma.go.jp/concern/publication/simulatetool/index.html>

### 2. 危険物タンクの津波浸水被害状況と浸水による被害予測式

以降は、消防庁消防大学校消防研究センター畑山健氏の提供による「第15回消防防災研究講演会資料」<sup>3)</sup>の一部を抜粋・編集したものである。

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) では、各地に大きな津波が押し寄せ、沿岸部に立地していた大 outnumber の石油タンク (屋外タンク貯蔵所) に、甚大な被害が発生した。この津波被害の実態を明らかにするため、消防研究センターでは現地調査を行った。また、消防庁危険物保安室では消防本部を通じて事業者へのアンケート調査により、被害状況を調べるとともに、津波浸水深と被害発生状況の関係を整理し、今後の被害予防軽減対策を提案している<sup>2)</sup>。この津波浸水深と石油タンクの被害発生状況の関係の整理は、これまでに列のないものと思われる。

消防庁危険物保安室では、2004 年インドネシア・スマトラ島沖地震 (Mw9.1) に伴って発生した津波により、スマトラ島北西端のバンダアチエ市近郊で石油タンクが流される被害が発生したことを受け、平成 18 年度 (2006 年度) から平成 20 年度 (2008 年度) の 3 年間にわたって「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討会」(以下「平成 20 年度までの調査検討会」という。)を開催し、石油タンクの津波対策を研究した。この調査検討の一応の成果として、「屋外タンク貯蔵所の周囲における津波被害予防・軽減対策の検討フロー」が例示され、そこでの検討において利用可能なツールとして、津波を受けた石油タンクに滑動、転倒、浮き上がりなどの被害が発生するおそれの有無を評価する方法が提案された<sup>1)</sup>。危険物保安室では、ここで提案されている被害発生評価方法による予測結果と、今回の震災による実被害の発生状況を照合し、その有効性の検証も行った。

本稿では、上述の調査結果に基づく津波浸水深と石油タンクへの被害の発生状況の関係、平成 20 年度までの調査検討会で提案された被害発生評価方法の有効性の検証結果について述べる。

### (1) 津波浸水梁と石油タンクへの被害の発生状況の関係

危険物保安室では、同庁開催の「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」における取組の一環として、津波浸水梁と石油タンクへの被害の発生状況の関係を把握することを目的に、岩手県及び宮城県沿岸部の一部の地域を対象とした詳細なアンケート調査を行った。調査対象には、津波で被害を受けなかった屋外タンク貯蔵所も含められた。調査項目は、タンク本体の移動・損傷の有無、配管の移動・損傷の有無、タンク諸元（自重を含む）、地震発生時の貯油量と内容液の比重、タンクが受けた津波の浸水深などである。この結果、244基分のデータが集まった。

これら244基のうち、①「タンク本体にも付属配管にも被害がなかったもの」は116基、②「タンク本体には被害はなかったものの付属配管には被害があったもの」は60基、③「タンク本体と付属配管ともに被害があったもの」は68基であった。

図1は、タンクが受けた津波の浸水深とタンクの許容量に対して、①から③の被害発生状況をプロットしたものである。この図で、「タンクなし、配管なし」は①、「タンクなし、配管あり」は②、「タンクあり、配管あり」は③を意味する。おおまかな傾向として、浸水深が3m未満では、タンクにも配管にも被害は発生していないが、浸水深が3m以上になると被害が発生するようになることがわかる。さらに、浸水深が3～5mでは、タンク本体には被害はなかったものの付属配管には被害が発生したものと、タンク本体と付属配管ともに被害があったものの両方があるのに対し、浸水深が5m以上となると、ほとんどの屋外タンク貯蔵所で被害は配管のみにとどまらずタンク本体にも及んでいることがわかる。

図2から図6は浸水深のクラス別に、許容量と地震発生時の貯油量に対して①から③の被害発生状況をプロットしたものである。図2と図3は、浸水深が3m未満の場合には、ごく容量の小さなタンクを除けば、貯油量に関係なく、タンク本体にも付属配管にも被害がなかったことを示している。図4からは、浸水深が3～5mになると、前述のとおりタンク本体には被害はなかったものの付属配管には被害が発生した屋外タンク貯蔵所と、タンク本体と付属配管ともに被害があったものの両方あることがわかるが、さらにこの図はタンク本体と付属配管ともに被害があった屋外タンク貯蔵所は、容量が小さくかつ貯油量も少なかった（ほぼ空の状態であった）ことも示している。図5と図6からは、浸水深が5mを超えると、特定屋外タンク貯蔵所クラスの大きさのものを含めほとんどの屋外タンク貯蔵所において、タンクが空に近い状態でなかったとしてもタンク本体に被害が発生していることが読み取れる。本体が被害を受けたタンクのなかには、許容量約6千kLで貯油率が約20%だったもの、許容量約3千kLで貯油率が50%強だったもの、許容量約1千kLでほぼ満液だったものがある。

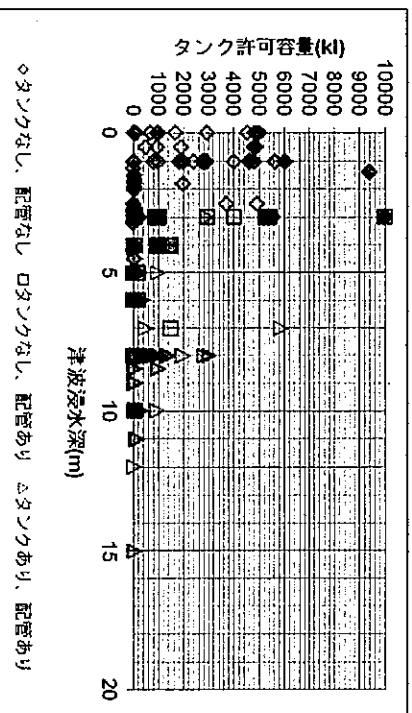


図 1 津波浸水深と許容量に対する被害発生状況

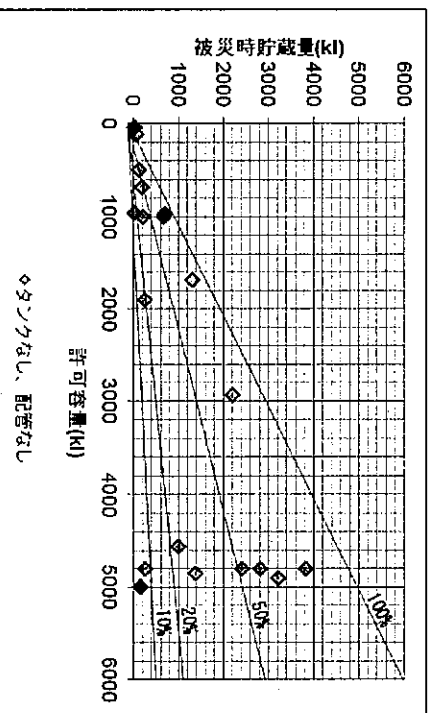


図 2 許容量と貯油量に対する被害発生状況 (浸水深 < 1m)

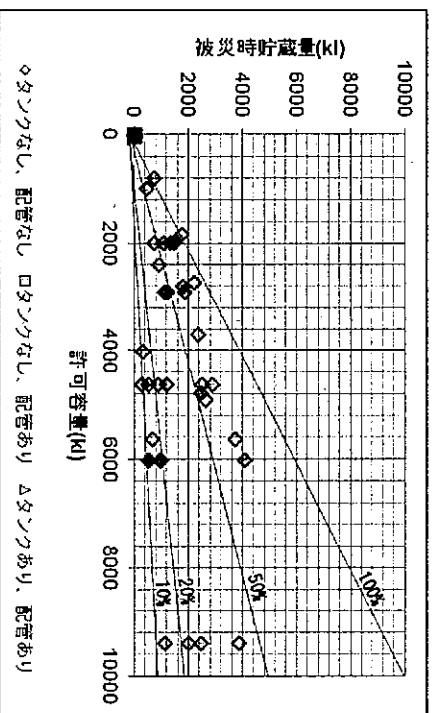


図 3 許容量と貯油量に対する被害発生状況 (1m ≤ 浸水深 < 3m)

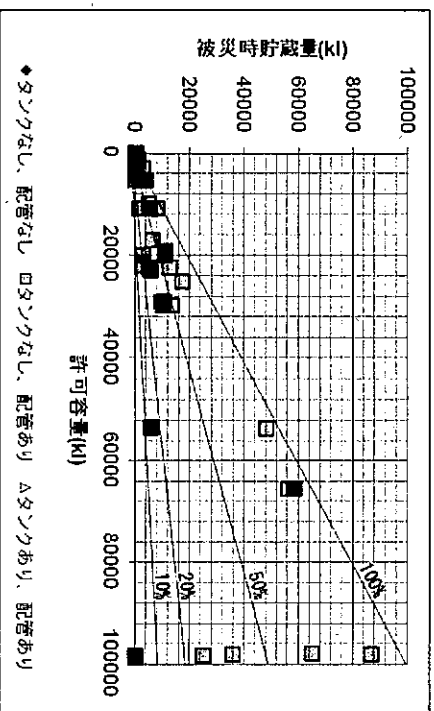


図 4 許可容量と貯油量に対する被害発生状況 (3m ≦ 浸水深 < 5m)

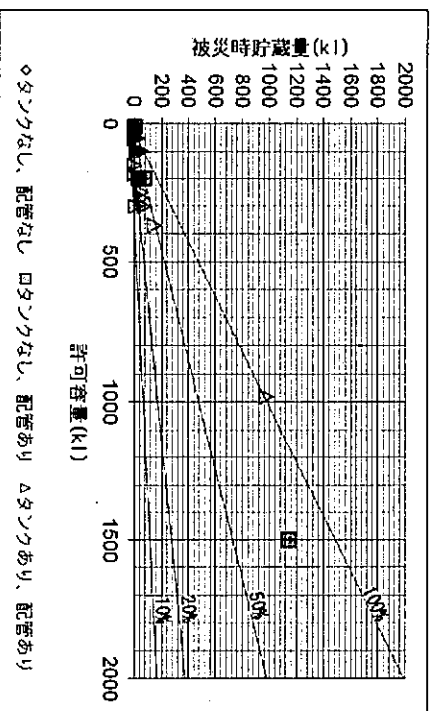


図 5 許可容量と貯油量に対する被害発生状況 (5m ≦ 浸水深 < 7m)

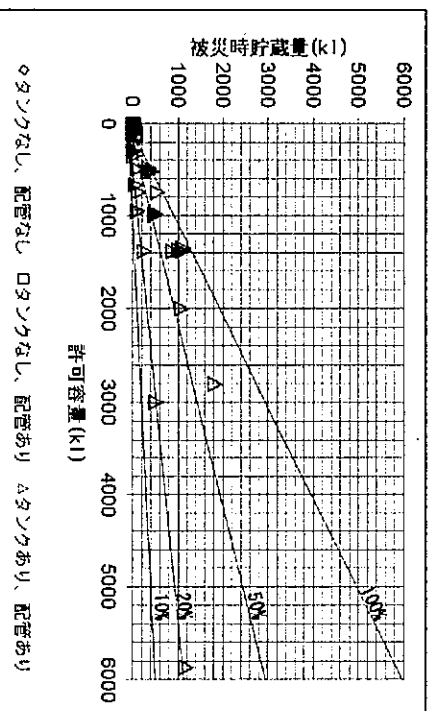


図 6 許可容量と貯油量に対する被害発生状況 (7m < 浸水深)

(2) 被害発生予測提案式の有効性の検証

平成 20 年度までの調査検討会の報告書では、円筒縦置き型タンクが津波を受けた時に発生するおそれのある被害形態には図 7 に示すようなものが考えられるとして、これらのうち、浮き上がり、滑動、転倒、内外水圧差による側板座屈について、その発生のおそれを評価するための方法が提案されている。例えば、滑動については(1)式で表現される。ここに、 $F_{sl}$  は滑動安全率

で、1 以下だと滑動のおそれあり、1 を超えるとおそれなしと評価される指標である。 $\mu$ 、 $W_T$ 、 $W_L$ 、 $F_{H}$ 、 $F_{IV}$  は、それぞれタンク基礎とタンク本体の摩擦係数、タンク自重、タンク内溶液の重量、タンクに作用する津波による水平力、タンクに作用する津波による鉛直力である。

$$F_{sp} = \frac{\mu(W_T + W_L - F_{IV})}{F_H} \quad (1)$$

タンクに作用する津波による水平力及び鉛直力を計算する式として、それぞれ次のものが提案された。これらの式は水理模型実験<sup>9)</sup>に基づいて得られたものである。

$$F_H = \frac{1}{2} \int_{\pi}^{\pi} \rho g \left[ \alpha \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 p_m \cos(m\theta) \right]^2 R \cos \theta d\theta$$

$$p_0 = 0.680$$

$$p_1 = 0.340$$

$$p_2 = 0.015$$

$$p_3 = -0.035$$

(2)

$$F_{IV} = 2 \int_0^{\pi} \rho g \left[ \beta \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 q_m \cos(m\theta) \right] R^2 \cos^2 \theta d\theta$$

$$q_0 = 0.720$$

$$q_1 = 0.308$$

$$q_2 = 0.014$$

$$q_3 = -0.042$$

(3)

上式で、 $\rho$  と  $g$  は海水の密度と重力加速度、 $\eta_{\max}$  は浸水深である。 $\alpha$  と  $\beta$  は浸水深と津波の流速に関係するフルード数によって設定される係数で、大きなフルード数、すなわち大きな流速に対して大きな値をとるよう設定される。 $\alpha$  は 1 から 1.8、 $\beta$  は 1 から 1.2 の値をとる。フルード数が 0.9 以下の場合は一値 1 とされる。

図 8 は、浮き上がり、滑動、転倒、内外水圧差による側板座屈の発生可能性を評価する提案式を用いて、代表的と考えられる諸元を有する容量 1 千 kL のタンクと容量 1 万 kL のタンクにおける被害発生のおそれを貯油率と浸水深に対して評価した結果である。この図は、各線を上回る浸水深があれば、その線に対応する被害形態が発生するおそれがあることを意味している。容量 1 千 kL のタンクでも、容量 1 万 kL のタンクでも、貯油率によらず、滑動が最も小さな浸水深で発生するおそれが生ずるという結果である。このことから、津波の到来時においては、タンクではまずもって滑動が生じるおそれが高いものと考えられた。

危険物保安室では、「(1) 津波浸水深と石油タンクへの被害の発生状況の関係」において述べた調査でデータが集まったタンクに対して、(1)式により滑動発生のおそれを評価し、その結果と実際の被害状況を比較した。図 9 は、実際に移動の被害が発生したタンク本体に対して滑動発生のお

おそれを評価した結果である。実際に移動の被害が発生したタンク 68 基のうち、滑動発生のおそれありと評価されたものは 62 基であり、約 90%のタンクで的中している。図 10 は実際には移動の被害が発生しなかったタンク 176 基のうち、滑動発生のおそれなしと評価されたものは 138 基であり、約 80%のタンクで的中している。実際に移動の被害が発生したタンクと発生しなかったものを合わせた 244 基のうち 200 基で、(1)式による評価結果と実際の被害状況が一致しており、的中率は約 80%である。実際に移動の被害が発生したにもかかわらず、滑動発生のおそれなしと評価されたタンクは 6 基であるのに対して、その逆、すなわち、実際には移動の被害は発生しなかったにもかかわらず、滑動発生のおそれありと評価されたタンクは 38 基ある。したがって、(1)の評価式は被害発生のおそれをやや過大に評価するもの、すなわち安全側の評価を与える傾向を有するといえる。

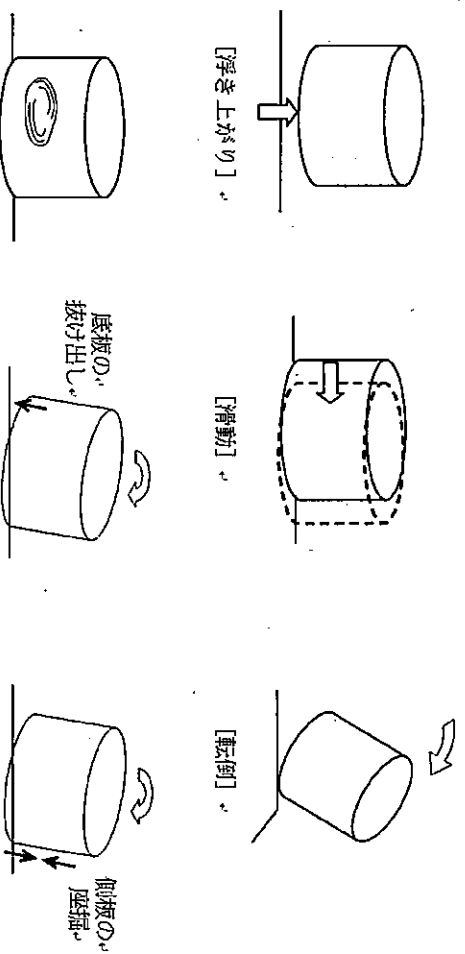


図 7 津波を受けたタンクに発生するおそれのあるものとして考えられた被害形態  
 【内外水圧差による側板座屈】、【傾斜による底板抜け出し】、【傾斜による側板座屈】、  
 【傾斜による底板抜け出し】、【転倒】、【浮き上がり】、【滑動】

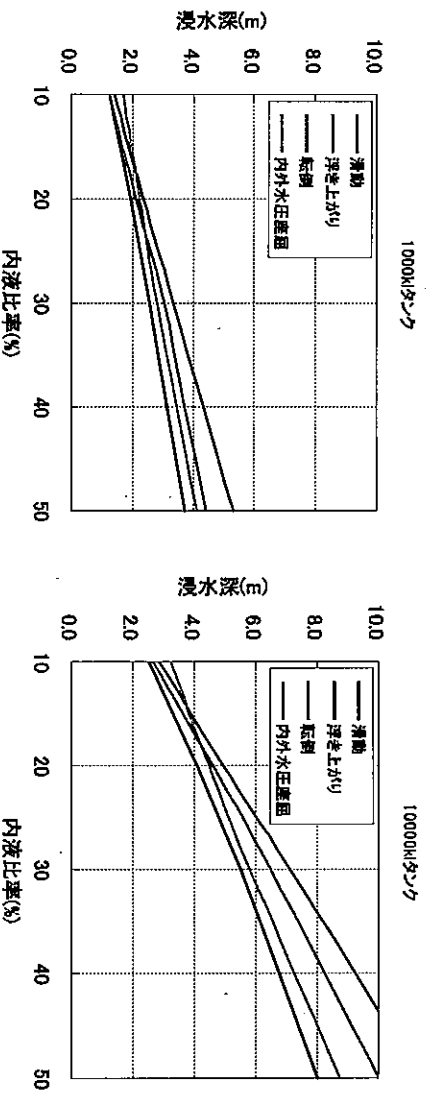


図 8 代表的と考えられる諸元を有するタンクに対する被害発生のおそれの評価結果

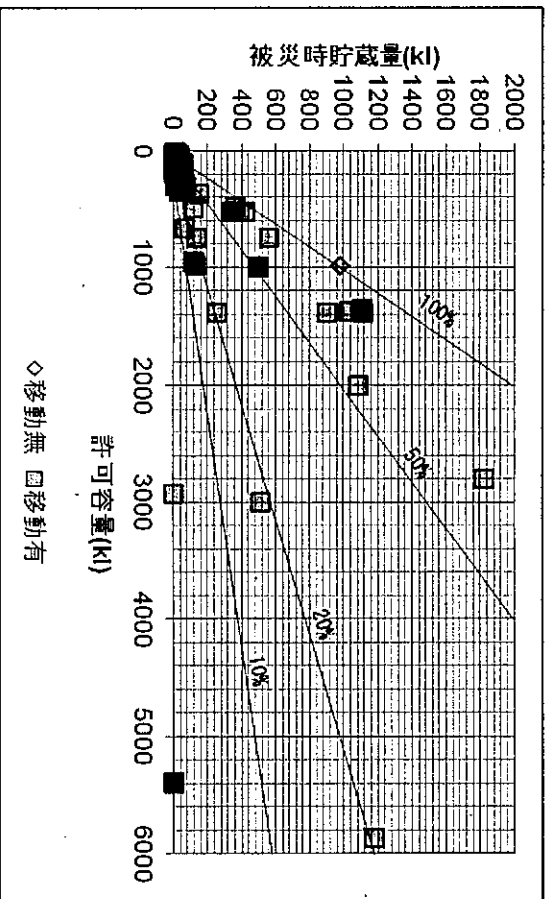


図 9 実際に移動の被害が発生したタンク本体に対する滑動発生のおそれの評価結果

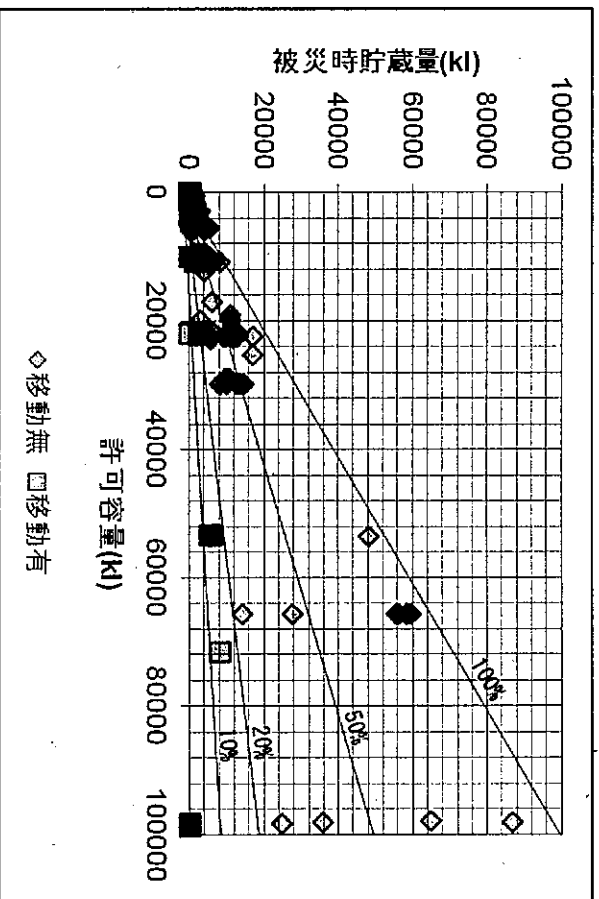


図 10 実際には移動の被害が発生しなかったタンク本体に対する滑動発生のおそれの評価結果

以上より、タンク本体に滑動が発生するおそれを評価するものとして平成 20 年度までの調査検討会で提案された方法は、有効性の高いものであることがわかった。本方法は屋外貯蔵タンクの移動の被害を予測するツールとして、今後の利活用が期待できる。

この結果を受け、危険物保安室では「屋外貯蔵タンクの津波被害シミュレーションツール」を開発・提供することとし、屋外タンク貯蔵所の具体的な津波被害予測に活用することとしている。



#### 参考資料 4 参考文献

- 1) 総務省消防庁：危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書， 2009
- 2) 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
- 3) 畑山健：石油タンクの津波被害について，第15回消防防災講演会資料，2012
- 4) 稲垣聡・池谷毅・大森政則・藤井直樹・向原健・畑山健：津波による屋外タンクの滑動・漂流実験および予測手法の提案，海岸工学論文集（土木学会）， Vol.55, 2008
- 5) 消防庁消防研究センター：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の被害および消防活動に関する調査報告書（第1報）， 2011
- 6) 東電設計株式会社：津波による石油タンクの被害予測手法に関する研究，平成16年度消防防災科学技術研究推進制度， 2005