

石油タンクのスロッシングと対策

座間 信作

(消防庁 消防研究センター)

2003年十勝沖地震において、特に苫小牧では2つの石油タンク火災、7基のタンクでの浮屋根沈没等の甚大な被害が生じた。この被害に鑑み、消防庁が主体となって、地震直後から火災原因を含め被害調査を精力的に行い、それに基づき被害防止・軽減策に係る種々の検討を行ってきた。その結果、石油タンクの甚大な被害はやや長周期地震動によって強く励起された石油タンク内容液の揺動(スロッシング)によるものである事が明らかとなった。この甚大な被害への対策として、やや長周期帯域の設計水平震度の見直し、揺動する浮き屋根の耐震強度の検討等がなされ、その結果に基づき平成17年法制化がなされた。更に、引続きタンクサイトでの地震観測、実規模タンクの振動実験等を行い、法令の有効性についての検証を行ってきている。本報告ではこれら一連の動き等について概観する。

1. はじめに

2003年十勝沖地震では、苫小牧において石油タンクに火災、浮屋根の沈没、大量の油の溢流等の重大な被害が生じた。特に、地震の2日後に発生したナフサタンクの火災は、1964年新潟地震以来のタンク全面火災となり、必死の消火活動にも拘らず44時間も燃え続け、社会的関心を集めた。これらの石油タンク被害は、タンク貯液が3～4mも激しく揺動したために生じた。この揺動はスロッシングと呼ばれ、1964年新潟地震、1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震、1999年台湾・集集地震、同年トルコ・コジャエリ地震などでも強く励起され、石油タンクに多大な被害をもたらしている。石油タンクのスロッシングは、内容液と地震動の共振現象である。固有周期はタンク直径と液高によって与えられ、およそ3秒から15秒程度である。この周期帯の地震動、いわゆる‘(やや)長周期地震動’がこれら甚大な被害の原因であった。以下では、2003年十勝沖地震における長周期地震動による石油タンクの被害とその被害の甚大さに鑑み検討された対策について述べる。

2. 2003年十勝沖地震での石油タンク被害

この地震での石油タンクの被害としては、釧路においてアンカーボルトの引き抜け等の短周期地震動による被害が認められた以外は、やや長周期地震動によって励起されたスロッシングに起因するものであった。危険物保安技術協会(2004)によれば、調査された苫小牧市および苫小牧東部工業地域での容量1,000kl以上の特定屋外貯蔵タンク283基中、164基のタンクで何らかの被害が認

められた¹⁾。以下、これらの中から特徴的な被害を紹介する。



図1 地震直後のリング火災

(1) タンク火災

2基のタンクで火災が発生した。地震とほぼ同時に発生した最初の火災では、タンク浮屋根と側板との間の火災(リング火災)、タンク東側地盤での火災およびタンク北側直近の配管の火災が認められた(図1)。原因は、大きなスロッシングのため、浮屋根とタンク上部施設とが衝突したことにより発生した火花が、浮屋根上の可燃性混合気に着火したものと考えられている²⁾。配管の火災については、地震により破断した配管から原油が漏洩し、それにタンク上部で発生した火災が延焼した可能性が、また防油堤内で確認された火災については、スロッシングにより溢流・漏洩した原油に、タンク上部で燃焼していた原油が飛散し延焼した可能性が高いとされている²⁾。

全面火災に至ったナフサタンク(図2)では、火災の前

日に、浮屋根が油中に完全に没したため、ナフサの揮発防止のため消火用の泡を放出、液面を密封していたところ、火災当日の強風のため泡が風に押され、タンク液面の北側3分の2が大気中に露出した状態となっていた。このような状況の中、消火泡は時間の経過とともに水溶液に戻り、ナフサ中を沈降する際に帯電(沈降帯電)し、発生した電荷が浮島状に孤立した泡に蓄積され、泡の電位が上昇し、側板との間で放電が起こったため火災に至ったものと考えられている²⁾。



図2 地震の2日後に発生した全面火災

(2) 貯液の溢流・流出

想定以上の地震動強さのため、貯液が大きく揺動し、浮屋根式タンクの側板上部から大量の油が溢流する(3基)、固定屋根式タンクの側板と屋根接合部を突き破って溢流する(1基)という事例が認められた。また、2基のタンクで、浮屋根上に流出した油がドレイン排水口から内部配管を通して外に流出した。

(3) 浮屋根の変形・座屈・破断・沈没

図3は、浮き屋根の揺動に伴い円周方向の曲げ変形を受け、浮き室および屋根板デッキの接合部が破断した状況を示す。このため、浮き室内及び浮き屋根上に大量の油が流入し浮力を保てなくなった浮屋根が沈没するという重大な事態に陥ったタンクが7基あった。

(4) その他の被害

ゲージポール、ガイドポールの変形・破断、回転梯子の損傷・落下、測定小屋傾斜、屋根板・ラフター変形、ウェザーフードの損傷、フォームダム変形、ルーフサポート変形、吹き溜まり防止堰の変形・切断、回転止サポート変形、歩廊変形、ウェザーフードアース断線、アスファルト犬走り全面溶解、液面計破断等が認められた。



図3 ポンツーンの破断

3. 被害の整理

苫小牧地区の全タンクのスロッシング状況を概観するために、速度ポテンシャル理論に基づく、地震動の水平2成分を入力とするスロッシング時刻歴応答解析法³⁾を用いて、全石油タンクの最大上昇量を推定した(図4)。ここで、苫小牧地区のタンクサイトは大きく2つに分けられるので、それぞれの代表的事業所で得られた地震記録を用いた。またスロッシングの減衰定数は、固定屋根式タンク(CRT)0.1%、シングルデッキ(FRT(S))及び内部浮屋根式タンク(CFRT)0.5%、ダブルデッキ浮屋根式タンク(FRT(W))1%、またスロッシング2、3次モードについては共通に5%とした⁴⁾。この図で塗りつぶしたシンボルは何らかの被害があったことを示す。大きな丸を付したものは、火災や浮き屋根の沈没という甚大な被害のあったタンク及びポンツーン内に油が確認され沈没の恐れのあるタンクである。

図4から被害の特徴を整理すると、

- 1) スロッシング1次固有周期5秒付近で固定屋根式タンク(CRT)での波高は4mを上回っているものもあるが、甚大な被害とはなっていない。甚大な被害を受けたタンクは、
- 2) 1例を除いて全てシングルデッキ浮屋根式タンクである。
- 3) スロッシング固有周期は7秒以上である。
- 4) 周期12秒付近のタンクを除き、最大波高は2m以上である。
- 5) 周期12秒付近のタンクについては、2次モード(周期5.6秒)が卓越したことが、沈没の原因となった^{5, 6)}。
- 6) 上記以外のタンクの浮屋根の沈没は、大きな波高によるポンツーン部分への過大な荷重による破断が原因となった^{5, 6)}。

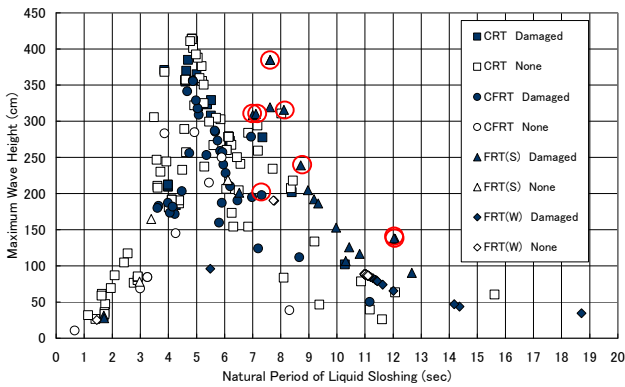


図4 苫小牧における全タンクに対する屋根形式を考慮した最大波高予測値の分布と被害程度

4. スロッシングへの対策

従来、石油タンクのスロッシング対策は、できるだけ火災を起こさないための構造物への直接的対応が主としてなされてきた。即ち、1964年新潟地震でのスロッシングに起因する火災に対しては、その原因として考えられた浮き屋根と側板の間のシール機構部分の摺動による火花発生を避けるため、金属製からソフトタッチのシールあるいはチューブシールとした。1983年日本海中部地震では、秋田において発生したリング火災に対して、この原因が浮き屋根と側板内部に設けられた設備との接触・衝突であるとされたことから、側板内部への突出部分をなくす、直下のウェザーシールド(雨よけ)の材質を金属以外とする等とした。

一方、従来規定のなかった液面高さの管理、即ち浮き屋根の衝突等による火災発生を回避するための空間余裕高さの規定が1983年4月に始めて導入され(自治省告示, 1983), 地震動の強さの一つの指標である速度応答スペクトルを約100cm/sと定めた。これはおよそ高さ2mの空間確保に相当するものであった。

このような対策が遵守されていた中で、2003年十勝沖地震で石油タンクに上述の甚大な被害が生じた。この地震による石油タンク被害からの対策に係る教訓は以下のように纏められる。

- 1) リング火災(第1火災)は、想定以上の地震動を受けて励起された大きなスロッシングのため、浮き屋根と上部設備とが衝突したことが発生の原因であると考えられている。従って、液面をその地域およびタンク毎に適正に管理することが重要で、そのためには地域・タンク毎(周期別)に地震動を適正に設定すること。
- 2) 全面火災(第2火災)では、大きなスロッシングにより浮き屋根が沈没したことが第1の要因であり、従っ

て浮き屋根の浮き機能の確保が極めて重要となる。そのため、地域・周期を考慮した地震動を踏まえたスロッシングに対する浮き屋根強度の検討を行うこと。

- 3) 火災発生に備えた消火方法の見直し、浮き屋根の沈没・大量の油の浮き屋根上への滞油への対応としての適切な油の抜き取り等の事後処理の見直しを行うこと。

このため、消防庁では地震直後から、地震動の適切な設定と浮き屋根強度等についての検討を行ってきた。

地震動の設定に関しては、全国84箇所(当時の石油コンビナート地区)に対して、主に地震記録(気象庁1倍強震計記録, K-NET, 港湾強震記録など)を用いた経験的手法に基づき、特に揺れやすい地域を特定し、それらの地域毎に図5のように周期の関数としてスペクトルを与えた⁵⁻⁷⁾。

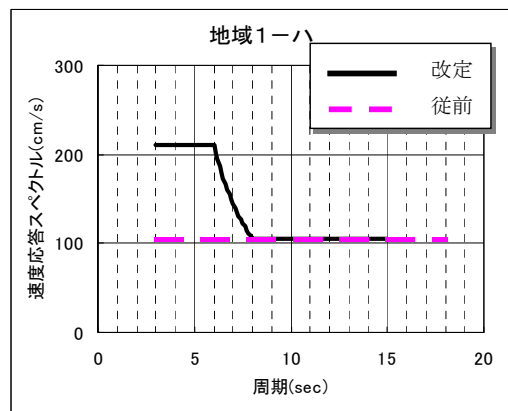


図5 改訂された長周期帯域の速度応答スペクトルの例
地域1-H(石狩, 上磯, 秋田, 清水, 名古屋, 四日市, 大阪湾岸)

浮き屋根強度については、浮き屋根と内容液との連成振動を考慮した有限要素法による解析結果を整理し、外周浮き室(ポンツーン)にかかる断面力算出手法を導出することによって、ポンツーンの強度評価を可能とした。これには、スロッシングの1次モードにおける非線形性の影響および2次モードの影響が取り入れられている。

これによって、地域特性を考慮した地震動に基づく、地域に応じた浮き屋根の耐震強度評価が可能となり、改修が必要な浮き屋根式タンクの抽出、更には補修方法の提案、妥当性の評価が可能となった。

以上は、従来の浮力だけの浮き屋根の設計から、地震力を加味した設計・保守管理を可能とした世界で初めての試みであり、2005年消防法改正(消防危第14号, 2005年1月14日)に取り入れられた。

この他、タンク付属設備等との浮き屋根の衝突防止の徹底、ドレイン配管への対策(雨水排水系統からの危険物の漏洩を感知し、短時間のうちに漏洩防止のための緊急遮断システムの設置)、タンクシール部の機能点検、

固定消火設備の有効性確保，防災設備の信頼性向上（停電時のバックアップ電源の整備），同時多発被害への対応（効率的なパトロールの実施，職員の非常参集，人員，資器材の効率的運用等の訓練），大容量泡放射システムの整備など総合的な対策が講じられてきている。

4. 消防法改正後の検討・検証

上述のように浮屋根の耐震性に係る技術基準が整備されたわけではあるが，例えば地震動の設定においてはタンクサイトと予測地点との地震動特性の差異については依然不明のままであること，浮屋根強度の検討に関しては主に数値的応答解析結果に基づくものであって，実際のタンクについて検証すべきとの認識があったことから，消防庁では更なる検討を行ってきた^{8, 9)}。

(1) 地震動

図5に示したスペクトルは，主に地震記録を用いた経験的手法に基づき推定されたスペクトルに基づき行政的判断が加わって決められたものである。その元となった地震記録はできる限りタンクサイト最寄りのもの(基準点)が用いられたのであるが，タンクサイトの地震動との相違については不明であった。そこで，消防庁は揺れやすいとされたコンビナート地区に20台の速度型強震計(含む消防研)を設置して地震観測を行うとともに(図6)，基準点とタンクサイトでの同時微動測定を実施した。その結果，特に設計スペクトルの修正を施すほどの差異は認められなかった。図7, 8にタンクサイトと基準点との地震動のスペクトル比，微動のスペクトル比の例を示す。但し，地震観測に関してはまだ記録数が少なく今後の継続的实施が必要である。

(2) 浮屋根挙動

容量15,000klの実タンク(図9)および直径7.6mの模型タンクの揺動実験を行い，大規模タンクの浮屋根揺動時の変形挙動，非線形スロッシングの液面増分等に係る検証を行った¹⁰⁻¹²⁾。その結果，以下が明らかとなった。

1) 2次モードが卓越する場合のデッキの面外変形量 Δ とポンツーンの半径方向の変形量 u_{r0} に関する消防法における次の関係式，

$$u_{r0} = 0.082 \times \Delta^2 \quad (\text{単位: m})$$

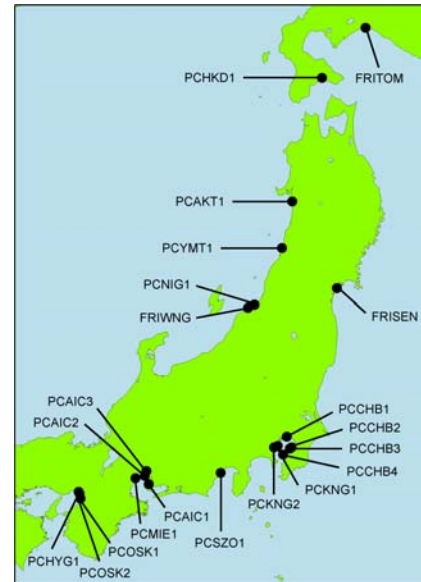


図6 石油コンビナートでの地震観測点⁹⁾

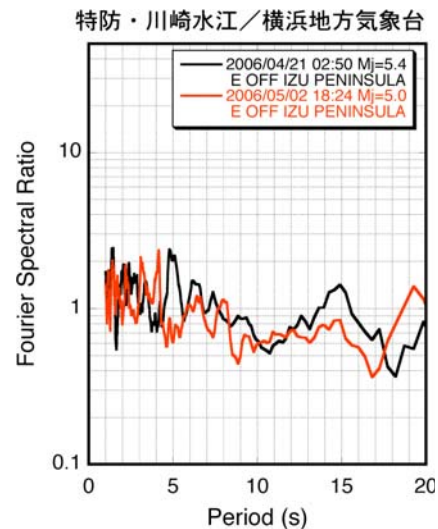


図7 地震動のスペクトル比⁹⁾
(京浜臨海横浜地方気象台)

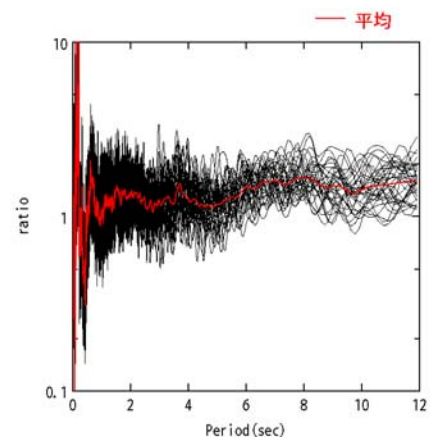


図8 微動のスペクトル比⁸⁾
(京浜臨海横浜地方気象台)

は実験的にも成立する。

2) 大きなスロッシングが発生した場合の速度ポテンシャル理論からの波高のずれ $\Delta\eta$ (非線形液面増分) は以下のように提案されていたが、15,000kl 実タンク揺動実験からこれが成り立つことが検証された。

$$\Delta\eta = 0.04 \cdot \eta_{\max}^{(1)} \cdot \cos 2\theta$$

ここで、 $\eta_{\max}^{(1)}$ 、 θ は速度ポテンシャル理論での1次モードの最大波高、タンク側板周方向角度を示す。

3) ポンツーンに発生する歪は消防法で示された算出式に一致する。



図9 15,000klタンクでのエアシリンダーを用いた浮き屋根揺動実験

5. その他の諸問題

(1) 減衰定数

スロッシング挙動の記述に速度ポテンシャル理論がよく用いられる。その際必要となる周期と減衰定数のうち、減衰定数については実タンクでの検討例は限られている。実タンクの浮き屋根1次モード振動実験では¹²⁾、減衰定数に振幅依存性が認められること、粘性減衰だけが働くとする振幅がp-p 1m程度以上で約1%、10cm程度以下で3.5%程度と大きく異なること等が示された。また、直径7.6m模型タンクの振動実験¹¹⁾では2次モードの減衰定数が求められていて、浮き屋根の厚さ(0.6mm、0.3mm)によって0.9-3.6%、1.5%程度とばらつく。地震時の挙動から推定された他の研究⁴⁾ではシングルデッキ浮き屋根式タンクで1次モード0.5%程度で、2次モードで5%程度と若干異なった結果が得られており、今後の更なる検討が必要である。なお、油種による減衰定数の違いについては、間接的にはあるが、2003年十勝沖地震での釧路での液面計データに関する検討からは無視できることが暗に述べられている⁴⁾が、更なる検討が必要である。

(2) 溢流量の算出

1964年新潟地震では、20,000kl固定屋根式タンク2基で重油が屋根を破り、容量の約5%にあたる2,000klが噴出・溢流した¹³⁾。1983年日本海中部地震での新潟、2003年十勝沖地震での苫小牧でも大量の油の溢流が確認されている。後者では第2火災を起こしたタンクのごく近くの灯油タンク(浮き屋根式)からの溢流量が多く、防油堤内に灯油が30-40cm滞留した。また、第1火災でも溢流した油からの火災が認められている。従って、火災発生、延焼危険防止の観点から溢流量の見積りが極めて重要であるが、検討例は限られている^{14,15)}。これらは振動実験に基づくもので、溢流量算定の実験式が提案され、上記地震での溢流量がおおよそ説明できることが示されたが、更なる精度の向上が望まれる。その際には、粒子法などによるシミュレーションとの比較検討も、様々な条件下での有用性を担保するために必要であろう。

(3) 浮き屋根の衝動あるいは降下

2003年十勝沖地震では、苫小牧東部工業地域にある幾つかのタンクの側板上部に塗装の剥れが斜めに点々と認められた。これはスロッシングによる液面の動きに伴い、ポンツーン側板側下部に取り付けられた浮き屋根衝突防止(リミッタ)が側板に衝突したためと考えられる。更に、1983年日本海中部地震の際に浮き屋根が側板に当たる音を聞いたとの証言もある。これらは浮き屋根が液面上を衝上あるいは斜降下したためと考えられる。いずれにしても側板に損傷をもたらす恐れがあり、事実の確認が必要である。

(4) リアルタイム浮き屋根被害予測

地震動の見直しとそれに基づく管理液面の低減、浮き屋根強度の算定とそれに基づく浮き室の補強等がなされてきているが、それでも想定以上の地震力が作用すれば浮き屋根の損傷等が起こりうる。従って、2003年十勝沖地震後においては、「効率的なパトロールの実施、職員の非常参集、人員、資器材の効率的運用等」も掲げられた²⁾2003年十勝沖地震後においては、「効率的なパトロールの実施、職員の非常参集、人員、資器材の効率的運用等」が掲げられているのである¹⁶⁾。このような措置をできるだけ迅速・的確に行うためには、まず地震直後にどのタンクでどのような被害が発生し得るのかを即時的に判断し、それに基づいた効率的な点検、対応を行うことが重要と考えられる。この目的のために、地震動観測記録に基づくリアルタイムシステムが構築されてきている^{17,18)}。消防研究センターでは上述の溢流量算定をも機能の一部とした石油タンク被害推定システムを開発しつつある(図10)。

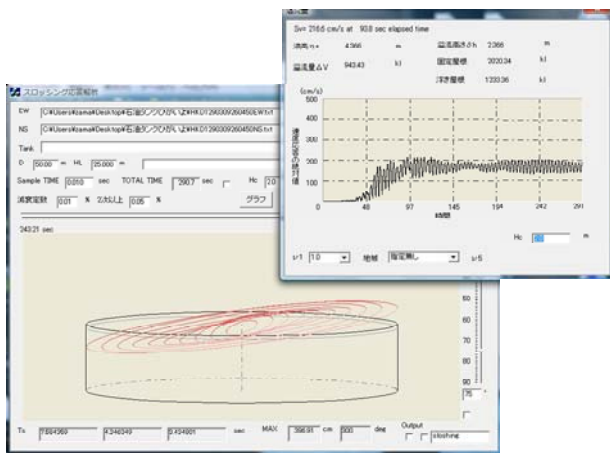


図10 石油タンク被害推定システム：溢流量算定機能

5. おわりに

2003年十勝沖地震での甚大な石油タンク被害に鑑み実施された被害調査、及び被害防止軽減対策として消防庁が主体となって行ってきた種々の検討結果を示した。これらの検討に基づき消防法令の改正が平成17年1月に改正され、必要なタンクについては平成19年4月に液面調整がなされ、平成29年3月までに浮屋根を改修することとされた。大地震が発生した場合には、液面調整がなされていたとしても、浮屋根が大きく揺動することは現時点では防げないので、改修前の浮屋根については被害が生じうると考えておくべきである。石油タンクは他の構造物と比べ構造的には単純であるが、ここで述べたようにまだまだ不明のことも多くある。地震観測も含め継続的な検討が必要である。

参考文献

- 1) 危険物保安技術協会：釧路市、苫小牧市及び苫小牧東部工業地域における屋外タンク貯蔵所の被害状況, Safety & Tomorrow, 95, pp.23-39, 2004
- 2) 西 晴樹, 横溝敏宏：出光興産(株)北海道製油所タンク火災に係る調査概要について(最終報告), 消防研究所報告, 100, pp.59-63, 2006
- 3) 座間信作：1983年日本海中部地震による苫小牧での石油タンクの液面揺動について, 消防研究所報告, 60, pp.1-10, 1985
- 4) 座間信作, 西 晴樹, 廣川幹浩, 山田 實, 畑山 健：石油タンクのスロッシングの減衰定数, 消防研究所報告 98, p.66-73, 2004
- 5) 消防庁：石油コンビナート等防災体制検討会・屋外

タンク貯蔵所における技術基準等検討部会報告書, 2004年1月

6) 危険物保安技術協会：屋外タンク貯蔵所浮屋根審査基準検討会報告書, 2004年9月

7) 座間信作：やや長周期地震動のスペクトル特性から見た地域区分の見直し, Safety & Tomorrow, 101, pp.14-26, 2005

8) 消防庁：やや長周期地震動に係る危険物施設の技術基準に対応した合理的改修方法の開発に関する調査検討報告書, 2006年3月

9) 消防庁：やや長周期地震動に係る危険物施設の技術基準に対応した合理的改修方法の開発に関する調査検討報告書, 2007年3月

10) 西晴樹, 山田實, 座間信作, 廣川幹浩, 関根和喜, 箕輪親宏, 御子柴正：小規模タンクを用いたスロッシング時の浮き屋根の揺動に関する実験的研究, 圧力技術, Vol. 45, No. 3, pp.118-126, 2007

11) 西 晴樹, 山田 實, 座間 信作, 畑山 健, 関根 和喜, 御子柴 正, 箕輪 親宏：スロッシングにおける浮き屋根の挙動-直径7.6m模型タンクによる実験(2次モードの影響), 圧力技術, 45-6. pp.357-363, 2007

12) Haruki NISHI, Minoru YAMADA, Shinsaku ZAMA, Ken HATAYAMA, Kazuyoshi SEKINE：Experimental Study on the Sloshing Behavior of the Floating Roof using a Real Tank, Journal of High Pressure Institute of Japan, 46-4, pp.4-17, 2008

13) 電力中央研究所・技術研究所：新潟地震被害現地調査報告, 技術研究所業務資料(特640001), 1964

14) 座間信作, 山田 實, 西 晴樹・他：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101, pp.14-20, 2006

15) 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, 2008(印刷中)

16) 消防庁：危険物の規制に関する規則の一部を改正する省令等の施行について, 消防危第14号, 2005

17) 座間信作, 畑山 健, 吉田聖一, 河野和間, 関根和喜, 丸山裕章：石油備蓄基地のリアルタイム地震被害評価システムの構築, 圧力技術, 40-3, pp.26-37, 2002

18) 大保直人, 加藤健治：リアルタイムスロッシング評価システム, 大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム講演概要集, pp.15-18, 2005