

4.3 津波・被害調査

4.3.6 石油タンク等の危険物貯蔵施設への影響の調査

(1) 調査研究の目的と概要

(a) 課題名

石油タンク等の危険物貯蔵施設への影響の調査

(b) 担当者

| 所属機関 | 役職 | 氏名 | メールアドレス |
|-------------|------------|------|------------------------------|
| 独立行政法人消防研究所 | 基盤研究部長 | 座間信作 | zama@fri.go.jp |
| 独立行政法人消防研究所 | プロジェクト研究部長 | 山田 實 | myamada@fri.go.jp |
| 独立行政法人消防研究所 | 基盤研究部主任研究官 | 西 晴樹 | nishi@fri.go.jp |
| 独立行政法人消防研究所 | 基盤研究部主任研究官 | 畑山 健 | hatayama@fri.go.jp |
| 独立行政法人消防研究所 | 基盤研究部研究員 | 廣川幹浩 | hirokawa@fri.go.jp |
| 危険物保安技術協会 | タンク部調査役 | 柳沢大樹 | yanagisawa@khk-syoubou.or.jp |
| 茨城大学工学部 | 助教授 | 井上涼介 | inoue@mx.ibaraki.ac.jp |

(c) 調査研究の目的

平成15年(2003年)十勝沖地震により石油タンク等危険物関連施設が被災した被害を調査し、被害の原因となった地震動との関係を究明し、将来の地震に対する危険物関連施設の地震防災対策に資する情報を提供する。

(2) 調査研究の成果

(a) 調査研究の要約

将来の地震に対する危険物関連施設の地震防災対策に資するため、石油タンクのスロッシングと被害に関してアンケート調査および現地調査を行うとともに、強震記録を収集し被害の原因となった地震動との関係について検討した。結果は以下の通り。

- (1) 苫小牧地域、石狩市の石油タンクでは約2-3mの大きなスロッシングが発生し、火災発生2基、浮き屋根の沈没7基等の甚大な被害が生じた。
- (2) 苫小牧地域では、周期約4秒から10秒の帯域で、1%減衰速度応答値が管理液面高さに関する現行消防法での規定値約100cm/sを超え、そのうち周期約5秒から7秒までの帯域ではその2倍以上の極めて強い地震動であった。
- (3) 最大のスロッシング波高は周期約5秒と7秒のタンクで認められたが、甚大な被害は周期約7秒以上の大型石油タンクで発生した。

(b) 調査研究の成果

まず、石油タンクのスロッシングと被害に関して、北海道、東北地方、新潟県内の消防本部に対して行ったアンケート調査と苫小牧市、石狩市、釧路市の事業所で行った現地調査の結果を述べる。次に、これらの被害モードが石油タンクのスロッシングに起因するも

のと判断されることから、スロッシングの励起に強く影響を及ぼす周期数秒から十数秒程度のやや長周期地震動の特徴について、強震記録に基づいた解析結果を示す。最後に、観測された地震記録を用いたスロッシング応答解析を通して、地震動と石油タンク被害（特に浮き屋根被害）との関係を考察する。

1) 石油タンクのスロッシングと被害

a) 調査方法

スロッシングと被害の発生範囲及びその概要を知ることが目的として、北海道、東北地方、新潟県内の以下に掲げる 16 消防本部を対象としてアンケート調査を実施した。

釧路市、石狩北部地区消防事務組合、胆振東部消防組合、苫小牧市、室蘭市、南渡島消防事務組合、函館市、青森地域広域消防事務組合、北部上北広域事務組合、男鹿地区消防一部事務組合、秋田市、酒田地区消防組合、仙台市、新発田地域広域事務組合、新潟市、上越地域消防事務組合

回答はこれら全ての消防本部からあった。その結果を踏まえて、苫小牧市、釧路市、石狩市、青森県六ヶ所村の事業所に対して現地調査を行った。

b) スロッシング最大液面上昇量

アンケート調査の結果、室蘭市、青森地域広域消防事務組合、男鹿地区消防一部事務組合、秋田市、酒田地区消防組合、仙台市、新発田地域広域事務組合、上越地域消防事務組合の 8 消防本部からは、スロッシングなし、あるいは確認できていないとの回答があった。確認できていないというのは、固定屋根式タンク（CRT）であるとか、灯油などスロッシングによる油痕が残りにくい油種であるという事情による。アンケート調査と現地調査から分かった地域毎の最大上昇量（実際はこの値以上）は以下の通りである。

函館・南渡島：0.38m 新潟：0.07m むつ小川原：0.37m 釧路：0.35m
石狩北：約 3.0m 苫小牧西港：約 3.0m 苫小牧東部約 2.3m

苫小牧市とその周辺には 304 基の容量 1,000kl 以上の特定屋外貯蔵タンク（以下、特定タンク）が立地しており、アンケート調査の結果、98 基の石油タンクの液面上昇量を知ることができた。これらは、液面計により測定されたものの他、液面や浮き屋根の揺動の際にタンク内壁に付着した油痕や擦過痕から計測されたものである。図 1 は、この最大液面上昇量実測値を地震時のスロッシング固有周期（ T_s ）に対して示したものである。塗りつぶした点は、何らかの被害が発生した石油タンクであることを表している。 T_s が 7.6 秒の 2 基の石油タンクについては、油が溢流しており、最大液面上昇量は地震時の空間余裕高さ（液面から側板頂上までの高さ）約 2.2m を超えたものと考えられる。この図から、最大上昇量が 2m を超える大きなスロッシングは、 T_s が 6~8 秒の石油タンクで発生していることがわかる。苫小牧東部地域には、二つの石油備蓄基地があり、 T_s が約 11 秒のタンク（11.5 万 kl）では、0.5~1m 程度のスロッシングが発生した。なお、 T_s は D をタンク内径(m)、 H_l を地震時液面高さ(m)とすると、以下の式で計算される[Senda and Nakagawa(1954)]

$$T_s = 2\pi \sqrt{(D/3.68g) \cdot \coth(3.68H_l/D)} \quad (1)$$

c) 石油タンクに発生した被害

地震による石油タンク被害の形態を地震動の周期特性から分類すると、短周期地震動に

よるものとやや長周期地震動によるものとに大別される。前者には、側板下部の座屈、側板とアニュラ板接合部の破断、タンクの傾斜や沈下・横ずれ・転倒、接続配管の破損、アンカーボルトの引き抜け等がある。一方、後者には、貯液の溢流、固定屋根の破損や変形、浮き屋根デッキ板や浮き室の座屈あるいは破損、回転梯子や踊り場の損傷、ウェザーシールドの損傷、消火・散水・融雪用等の配管設備の損傷、ゲージポールやガイドポールの変形あるいは破断、エアフォームダムの損傷等がある。

表 1 に被害を受けた石油タンクの数地域毎に掲げる。苫小牧市とその周辺では、石油タンクを抱える事業所は二つの地域に分布している。一つは、製油所などが立地する苫小牧西港地域であり、他は、上述の苫小牧東部地域である。この二つの地域は、10km 程度以上離れているので、別々の区分とした。被害タンク数の欄に掲げている数字は、被害形態を問わず何らかの被害を被った石油タンクの数で、括弧内はそのうち被害程度が甚大なものの数である。ここで、被害程度が甚大なタンクとして分類したのは、(1) 火災が発生したもの、(2) 浮き屋根が沈没したもののいずれかあるいは両方である。この表から北海道南部に立地する容量 1,000kl 以上の特定タンクのうち 190 基が何らかの被害を被ったことがわかる。また、容量 500~1,000kl のいわゆる準特定屋外貯蔵タンク(以下、準特定タンク)のうち 6 基にも何らかの被害が発生している。

被害程度が甚大なタンクは、苫小牧西港地域に集中している。苫小牧西港地域では、48% にあたる 91 基の特定タンクが被災し、そのうちの 8 基が甚大な被害を被っている。一方、苫小牧東部地域では、甚大な被害は発生していないものの、76% ものタンクが何らかの被害を受けている。また、最も震源に近い釧路地域では、準特定タンク 15 基のうち 3 基が被害を受けており、苫小牧西港地域に比べて被害率が高い。釧路西港では、約 580gal と約 320gal の最大地動加速度(以下、PGA)が観測されている。被害としてタンク底部雨水侵入防止シールの剥離、設置導線の破断、不等沈下などが認められたことから、釧路市の石油タンクに発生した被害には長周期地震動のみならず短周期地震動も関与したと考えられる。一方、苫小牧市とその周辺、石狩市での PGA は、苫小牧東部で約 160gal、苫小牧西港付近で約 50 および 90gal であることから、これらの地域で発生した被害は長周期地震動によるものと推察される。

苫小牧東部地域と西港地域の被害状況を比較する上で、石油タンクの構造や運用形態も考慮に入れなければならない。まず、東部地域の大部分のタンクは備蓄用であり、通常満液の状態である。また屋根形式はダブルデッキ型である。一方、西港地域の石油タンクは、製造、出荷、貯油用であり、満液であるとは限らない(地震時平均貯油率約 49%)。また、この地域には、浮き屋根式(FRT)、内部浮き屋根を持つ固定屋根式(CFRT、比較的小型で揮発性が高く、品質の高さを求められる油種に用いられる)、内部浮き屋根を持たない固定屋根式(CRT、小型のタンクで揮発性が高くない油種に用いられる)などが混在している。また、この地域の浮き屋根は全てシングルデッキ型である。特定タンク全体で見ると、東部地域の被害率は西港地域に比べて大きな値であるが、FRT に限って見れば大差はない。苫小牧西港地域には CRT の特定タンクが多数立地しているが、これら比較的小型のタンクの被害率は 35% と低く、これが特定タンク全体に対する被害率を下げる要因になっている。上下 2 枚の鋼板で屋根全面を浮き室にしたダブルデッキ型の浮き屋根は、1 枚の鋼板の円周上などに浮き室を設けたシングルデッキ型の浮き屋根に比べて、損傷しても沈没す

るなど甚大な被害に至りにくいと考えられている。甚大な被害が西港付近に偏った一因には、両地域における浮き屋根の構造の違いも考えられる。

表 2 に苫小牧西港地域で甚大な被害を被った 8 基の特定タンクの諸元等を掲げる。2 基の FRT タンクから火災が発生した他、7 基のタンクで浮き屋根が沈没した。地震により FRT タンクで浮き屋根が沈没するという被害が発生したのは我が国では初めてであり、これは全面火災の危険を伴うことから重大視すべき事態である。発生したタンク火災 2 件のうち 1 件は、地震発生直後に容量約 3 万 kl の原油タンクで起きたリング火災とそのタンク周辺の配管等における火災で（9 月 26 日 4 時 52 分消防覚知）同日 12 時 9 分に鎮火するまで約 7 時間にわたって燃え続けた（写真 1）。2 件目の火災は、地震発生から 2 日後の 9 月 28 日に容量約 3 万 kl のナフサタンクで起きたもので（10 時 36 分消防覚知）これは全面火災に至り、9 月 30 日 6 時 55 分に鎮火するまで約 44 時間にわたって燃え続けた（写真 2）。この火災が全面火災となったのは、浮き屋根が沈没し、ナフサ油面が大気に露出していたためと見られている。我が国における浮き屋根式石油タンクにおける全面火災は、1964 年新潟地震以来 39 年ぶりのことである。

甚大な被害を被った 8 基のうち、タンク G（CFRT）を除く他の 7 基は FRT である。以下に、タンク A から F とタンク H の被害状況を写真で示す。写真 3 は、タンク A とタンク B の浮き屋根が沈没し、原油の油面が大気に露出している様子を写している。タンク B の油面の一部が白くなっているのは、油面と大気とを遮断するために注入された泡消火薬剤である。これらのタンクの周辺には、原油が地盤上に漏洩した痕跡が見られる。側板外壁に溢流の跡が見られないことから、雨水配水管から流出したものと考えられる。なお他の 2 基のタンクは、地震時には、1 基は検査のため開放中、他の 1 基の液高はタンク高さの約 8% であり被害はなかった。

写真 4 は、約 44 時間燃え続けた結果、原形をとどめない程大きく変形したタンク C、及び浮き屋根が沈没し灯油の油面が大気に露出しているタンク D とタンク E の様子を写している。写真 2 から分かるように、これらの浮き屋根が沈没したのは地震直後ではない。右上に写っているタンクは、D、E と同じ大きさのものであるが、地震時の液高はタンク高さの約 33% であった。

写真 5 は、タンク D の 26 個の浮き室の中で損傷のあった 6 室のうちの一つの損傷状況である。浮き室の外リム（側板側の壁）と下側板の溶接部が切れ、貯液が浮き室内に浸入可能な状況であったことが窺える。写真 6 は、タンク F の浮き屋根が沈没し、油面が大気に露出している様子を写している。油面が一部白くなっているのは泡消火薬剤が注入されたためである。このタンクの上方に写っているタンクで RC、K、CR と記号が付してあるのは、それぞれ容量約 6 万 kl の重油、灯油、原油タンクである。浮き屋根が沈没するほど甚大な被害を受けなかったこれら 8 基のタンクの地震時の Ts は 8.7 から 12.7 秒の範囲に分布しており、浮き屋根が沈没した容量約 3 万あるいは 4 万 kl の 4 基のタンク C、D、E、F よりもスロッシング固有周期が長い。一方、容量約 11 万 kl のタンク A、B は Ts を 12 秒付近に持ちながらも浮き屋根が沈没している。タンク A、B の被害が甚大になった原因については、後述する。

写真 7 は、浮き屋根は沈没しなかったものの、地震直後にリング火災等が発生したタンク H の浮き屋根上の様子である。このタンクには側板頂上部に液面計指示部などを格納し

た測定小屋が取り付けられていたが、これが屋根上に落下している。これは、スロッシングの際に測定小屋直下にボルトで取り付けられているゲージポールが浮き屋根の揺動によりタンク中心に向かって引っ張られたり、あるいは、浮き屋根自体が測定小屋下部に衝突したりしたためと考えられる。また、この測定小屋は、取り付け位置と時計回りに約 40° 回転した所にあり、旋回流が発生した可能性がある。

釧路市については、上述のように石油タンクには甚大な被害はなかったものの、アルミ製内部浮き屋根の補強材の一部変形、屋根支柱周辺のシール材の割れ、鋼製内部浮き屋根上へのガソリン飛散など、長周期地震動により励起されたスロッシングに起因するものと見られる被害が発生した。また、タンクの傾斜（約 1/48）、アンカーボルトの引き抜き、タンクヤード地盤の液状化、タンク底部雨水侵入防止シールの剥離、接地導線の破断など短周期地震動に起因するものと見られる被害も発生している。ただし、タンクの傾斜などは 1993 年釧路沖地震の影響も加わっている可能性がある。

石狩市の 12 基の特定石油タンクは、いずれも石狩湾新港地区に立地している。その中で甚大な被害を受けた 1 基は、容量 5,000kl の CFRT ガソリンタンク(最大液面上昇量が約 3m)で、内部浮き屋根が激しく破断している（写真 8）。

なお、青森県六ヶ所村の事業所における現地調査でも浮き室に軽微な被害が散見されたが、今回の地震によるものかは確認できなかった。

2) 長周期地震動の特徴

a) 苫小牧西港付近の長周期地震動

図 2 に苫小牧西港付近とその周辺の地図を示す。この地域では 5 地点で本震波形記録が得られている。図 3 にこれらの地点での速度応答スペクトル（減衰定数 $h=1\%$ ）を示す。製油所（R-Tomakomai）では、周期 3.2 秒から 10.7 秒の範囲で NS、EW 成分のいずれかあるいは両方の速度応答が 1m/s を超える長周期地震動が観測された。このうち周期 3.7 秒から 8.3 秒の範囲では、EW 成分の速度応答が 1.5m/s 以上のレベルを保ち、周期 4.8 秒で最大値 2.8m/s に達している。また、P-Tomakomai あるいは K-Tomakomai でも、周期 4.8 秒から 8.3 秒の範囲で EW 成分の速度応答が 1.5m/s 以上のレベルを保ち、製油所に限らず苫小牧西港一帯が同程度の長周期地震動に見舞われたことがうかがえる。苫小牧測候所(JMA-Tomakomai)と石油備蓄基地(B-Tomakomai)での周期約 4 秒以上の揺れは、苫小牧西港からの距離が 10km 程度であるとはいえ、かえって周期約 4 秒以下の比較的短周期の揺れの程度の方が苫小牧西港におけるそれと似通っており、深部地下構造の複雑さを想起させる。

ところで、消防法に基づく「危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示」（自治省告示第 99 号）では、スロッシングを想定した空間余裕高さを定めているが、ここでの速度応答値は約 1.0m/s であるので、今回、製油所で観測された長周期地震動は、最大でこのレベルの約 2.5 倍に達したことになる。

b) 勇払平野・石狩平野における長周期地震動

ここでは、苫小牧市が位置する勇払平野とその北方の石狩平野において観測された長周期地震動を見渡すことにより、苫小牧西港付近の揺れの特徴を見出すことにする。図 3 で

のピーク周期である $T_s=5$ 、7 秒及び苫小牧東部の備蓄タンクの $T_s=11$ 秒における速度応答スペクトル値 ($h=1\%$) のコンターマップを図 4 に示す。ただし、観測点間の補間は幾何的になされたもので、地下構造の影響が考慮されたものではない。この図から、速度応答が大きい地域は、苫小牧西港付近のみならず、勇払平野と石狩平野東部の広い範囲に及んでいることがわかる。

周期 7 秒における速度応答は、勇払平野中央部から石狩平野東部の中央部にのびる南北の軸に沿った地帯を尾根とする分布形状を呈しており、とりわけ苫小牧西港付近と石狩平野東部北端で値が大きい。また、千歳や南幌における東西成分の速度応答は苫小牧西港付近と同程度に大きい。更にこの図からは、苫小牧市内でも揺れの程度が異なっており、EW 成分の速度応答には約 2 倍の差がある。このようにやや長周期地震動といえども、僅かな距離で地震動が大きく異なることには留意すべきである。

この長周期地震動の生成・伝播過程を見るために、襟裳岬から苫小牧に至る観測点 (図 5) における加速度記録から得た速度波形を震央距離と絶対時刻を考慮して図 6 に示す。震源に近い HKD112 (襟裳岬: 震央距離約 70km) では最大振幅が NS 成分 14.5cm/s、EW 成分 12.3cm/s で、ほぼ 1 波が認められのに対して、HKD129 (苫小牧: 震央距離約 225km) では、31.0 (NS)、35.1 (EW) cm/s と大きく、また震動継続時間が長く、長周期成分が卓越している (図 5 のスペクトル参照)。この特徴は、勇払平野南東端に位置する HKD105 付近から見えはじめ、勇払平野内に入って徐々に顕著になっており、平野の地下構造が波動伝播過程に与える影響の大きいことが確認できる。

3) 地震動と浮き屋根被害の関係についての考察

ここでは、観測された地震動記録を用いてスロッシング応答解析を行うことにより、苫小牧市の石油タンクに発生した被害と地震動の関係について考察する。浮き屋根の沈没や火災といった甚大な被害は、スロッシングを発端とするものであるから、まず、最大液面上昇量と被害の有無、程度の間関係を整理したいが、最大液面上昇量は全ての石油タンクについて知られているわけではない。そこで、最大液面上昇量を地震記録の水平 2 成分を入力とした時刻歴応答解析法 [座間(1985)] により計算することにした。ここでは、スロッシングの 1 次モードから 3 次モードまでの寄与を考慮し、それらの減衰定数を各々 1%、5%、5% と仮定した。図 7 は、最大液面上昇量が測定されている苫小牧市とその周辺の石油タンクについて、測定値と計算値とを比較したものである。なお、苫小牧西港地域と苫小牧東部地域のタンクについての計算には、それぞれ製油所と備蓄基地で得られた地震動記録を用いている。スロッシング高さが側板全周に亘って計測されていないものがあったり、一部のタンクで溢流が発生したことなどを考慮すれば、両者はよく一致していると言える。そこで、同様の方法によって苫小牧西港地域と苫小牧東部地域にあるタンクについて最大液面上昇量を計算した (図 8)。これによれば、周期 5 秒、7.5 秒付近で最大液面上昇量は 3m を上回り、約 3.5 秒から 9 秒の間で 2m を越える結果となった。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ものであるが、 T_s が数秒台のタンクでは最大液面上昇量が 2.5m 程度以上、十秒台のタンクでは 1m 程度以上になると被害が著しくなる傾向が見られる。また、印は、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である。これらのタンクの最大液面上昇量は、 T_s が 7~8 秒のものでは一例を除いて 2.9~3.4m と見込

まれる。また、 T_s が約 12 秒のタンクでは最大液面上昇量は約 1.3m という結果になっている。

最大液面上昇量と被害が一對一に対応するならば、スロッシングによる石油タンクの被害を予測するためには最大液面上昇量を求めればよい。これは、速度ポテンシャル理論によって比較的精度良く推定できることから[座間(1995)]、結局地震動(速度応答スペクトル)を予測すればよいことになる。しかし、 T_s が約 12 秒であった容量約 11 万 kl タンクでは、最大液面上昇量は高々約 1.3m で、地震時の液高もタンク高さの 60%程度でありながら、浮き屋根の沈没という甚大な被害となった。これは、満液に近いタンクほど被害が発生すると従来考えられていたこととも異なる。そこで、この容量約 11 万 kl タンクを対象とした計算結果をより詳しく見ることにする。図 9 にスロッシング時の EW 方向の液面形状を示す。黒線、破線、灰色の線はそれぞれ 1 次(周期 12 秒)、2 次(周期 5.6 秒)、3 次モード(周期 4.3 秒)が卓越していると見られる時点の液面形状である。今回の地震では、図 3 における R-Tomakomai の速度応答スペクトルから分かるように、このような高次モードの周期でも強い地震動となっていて、大きく揺動している。この特徴は 1983 年日本海中部地震、1993 年北海道南西沖地震では認められていないものである。側板付近での最大上昇量への寄与は 1 次モードが主で高次モードは殆どない。1 次モードに相当する周期 12 秒の地震動強さはこれに比べ小さく、そのため最大上昇量は高々 1.3m となっているのである。以上のことから、容量約 11 万 kl タンクでの浮き屋根の沈没という甚大な被害は高次モードの影響が大きかったものと考えられる。ただし、現地調査によって浮き屋根の損傷を見分したところでは、浮き室と屋根部分(デッキ)との接合部が約 33m にも亘って破断しており、その破断面の視察から溶接不良の疑いも持たれている(写真 9)。これもまた、被害要因かもしれない。今後、この件に関しては強度試験等を通して明らかにされると思われるが、仮に溶接不良ということであれば、今回の地震による石油タンクの甚大な被害は、周期約 7 秒以上の浮屋根式タンクで最大上昇量が約 2m 以上の場合発生するとの纏めができ、地震動と被害との間に 1 対 1 対応関係が見出せることになる。

(c) 結論ならびに今後の課題

2003 年十勝沖地震では、北海道内の数多くの大型石油タンクにスロッシングを発端とする被害が発生した。なかには火災が発生したり、浮き屋根が沈没したりするという甚大な被害を受けたものもあり、これらの被害は苫小牧西港南岸の真砂地区に集中した。本稿では、アンケート調査や現地調査から分かったスロッシングと被害の実態を報告した。また、スロッシングの原因となったのは、周期数秒から十数秒程度の長周期地震動であったことから、全国的に稠密に分布する強震観測点で得られた地震波形記録を用い長周期地震動の特徴を述べた。さらに、苫小牧市とその周辺の容量 1,000kl 以上のタンクに対して、観測された地震動に基づいてスロッシングの解析を行い、地震動と被害の関係を考察した。スロッシングと被害の実態については以下のように纏められる。

(1) 苫小牧西港地域、苫小牧東部地域、石狩市の特定タンクでは大きなスロッシングが発生し、それぞれの地域における最大液面上昇量は、それぞれ約 3m(地震時の 1 次のスロッシング固有周期 $T_s=7.0$ 秒と 5.9 秒)、約 2.3m($T_s=7.7$ 秒)、約 3m($T_s=5.0$ 秒)であった。また、新潟でも最大液面上昇量 0.07m のスロッシングが発生した。

(2) 北海道南部に立地する容量 1,000kl 以上のタンクのうち 190 基が何らかの被害を被った。また、これより小さい容量 500~1,000kl のタンクのうち 6 基にも被害が発生した。苫小牧西港と苫小牧東部地域を合わせた地域では被害率が高く、容量 1,000kl 以上のタンクのうち 58%にあたる 170 基が被害を受けた。

(3) 火災発生、浮き屋根沈没の甚大な被害は、9 基のタンクで発生した。このうち 1 基は、石狩湾新港地域にある内部浮き屋根を持つ固定屋根式のタンク ($T_s=5.0$ 秒) で、内部浮き屋根が破損した。残りの 8 基は、いずれも苫小牧西港南岸の真砂地区に立地するもので、6 基の浮き屋根式タンクと 1 基の内部浮き屋根付き固定屋根式タンクで浮き屋根が沈没した。2 基の浮き屋根式タンクからはそれぞれリング火災 (継続時間約 7 時間) と全面火災 (約 44 時間) が発生し、全面火災となったタンクは浮き屋根が沈没したナフサタンクであった。

スロッシングの原因となった長周期地震動の特徴は、重大な被害が発生した苫小牧西港地域を中心に以下のように纏められる。

(4) 苫小牧西港南岸の真砂地区では、周期 3.2 秒から 10.7 秒の範囲で NS、EW 成分のいずれかあるいは両方の速度応答が 1m/s を越える地震動が記録された。このうち周期 3.7 秒から 8.3 秒の範囲では、EW 成分の速度応答が 1.5m/s 以上のレベルを保ち、周期約 4.8 秒で最大値 2.8m/s に達した。これは、石油タンクの空間余裕高さを定めた消防法の基準値約 1.1m/s の約 2.5 倍にあたる。真砂地区に限らず苫小牧西港一帯が同様の揺れに見舞われたが、苫小牧西港からの距離が高々 10km 程度の苫小牧測候所や苫小牧東部の石油備蓄基地での揺れは異なる。

(5) 長周期地震動が大きかった地域は、苫小牧西港地域のみならず、勇払平野と石狩平野東部の広い範囲に及んでいる。なかでも勇払平野中央部から石狩平野東部の中央部にのびる南北の軸に沿った地域での揺れが大きかった。この長周期地震動は、厚い堆積層により励起されたものであると考えられる。

(6) 今回の地震では、周期 7 秒の地震動レベルは、勇払平野南端の苫小牧西港地域と石狩平野北東端で最大であった。

地震動と被害の関係については、以下のように考察した。

(8) スロッシングによる最大液面上昇量は、地震動から概ね評価可能である。

(9) 被害が著しくなるのは、 T_s が数秒台のタンクでは最大液面上昇量が 2.5m 程度を、 T_s が十秒台のタンクでは 1m 程度を越える場合であった。甚大な被害は、 T_s が 7~8 秒のタンクでは最大液面上昇量が 2.9~3.4m 程度の場合で、 T_s が 12 秒のタンクでは約 1.3m で発生している。

(10) 最大液面上昇量が高々約 1.3m と見込まれる容量 11 万 kl のタンクにおいて、甚大な被害 (浮き屋根沈没) が発生した一因として、高次モードのスロッシングの影響が考えられるが、浮き屋根構造部材における溶接の不具合も考えられる。

消防法に基づく基準では、浮き屋根の構造については、豪雨時などの浮き屋根上の雨水の滞留に対して考慮するよう定めているが、スロッシングに対する浮き屋根の強度に関してはその限りではない。従って、今後の課題として、浮き屋根沈没に影響したと考えられる浮き室の破損、浮き室とデッキ板との接合部の破断について、一つ一つのタンクを対象とし

た強度面からの説明を行うことが先ず必要である。さらに、その検証を通して、今後浮屋根に対してどのような対策を施すべきかを明らかにすることも必要である。浮き屋根がない場合の液面の挙動は、地震動が与えられれば評価可能であるが、浮き屋根がある場合の挙動には不明な点が多く、やや長周期地震動による大型石油タンクの被害防止のためには、これらの課題を解決することが必要不可欠である。

(d) 引用文献

- 1) Senda K. and K. Nakagawa, 1954, On the vibration of an elevated water-tank - I, Technical Report of the Osaka University 4, 170, 247- 264.
- 2) 座間信作,1985,1983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 ,1-10 .
- 3) 座間信作,1995,石油タンクのスロッシングとやや長周期地震動特性,安全工学,34-3,148-155.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

| 著者 | 題名 | 発表先 | 発表年月日 |
|---|--|-------------------|-----------------------|
| 座間 信作 | 平成 15 年(2003 年)十勝沖地震の概要 | Safety & Tomorrow | Vol94, pp.12-19, 2004 |
| 座間 信作 | 2003 年十勝沖地震被害報告 - 石油タンクの被害 - | 震災予防 | No.194,pp.16-21,2004 |
| 座間 信作 | 石油タンクのスロッシング被害 - 十勝沖地震から学ぶ - | 検査技術 | Vol9-3,pp.28-37,2004 |
| 高崎 純治 西 晴樹 | 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(中間報告) | 消防研究所報告 | Vol97,pp.37-45,2004 |
| 畑山 健 座間 信作 | 平成 1 5 年 (2 0 0 3 年) 十勝沖地震の際の長周期地震動の特徴 | 消防研究所報告 | Vol97,pp.15-25,2004 |
| 畑山 健 座間 信作 西 晴樹 山田 實 廣川 幹浩 井上 涼介 | 2003 年十勝沖地震による長周期地震動と石油タンクの被害 | 地震 | 投稿中 |
| 畑山 健 座間 信作 西 晴樹 | 苫小牧における石油タンクのスロッシングと地震動 2003 年十勝沖地震 | 日本地震学会秋季大会 | 2004 年 10 月 |

| | | | |
|--|---|--|--------------|
| 畑山 健 座間 信作 | 2003 年十勝沖地震の際の 勇払平野における長周期 地震動の特徴 | 地球惑星科学関連学会 合同大会 | 2004 年 5 月予定 |
| 座間 信作 山田 實 西 晴樹 廣川 幹浩 畑山 健 柳沢 大樹 井上 涼介 | 平成 15 年十勝沖地震に おける石油タンクの火災 とタンクの損傷について | 地球惑星科学関連学会 合同大会 | 2004 年 5 月予定 |
| 廣川 幹浩 山田 實 西 晴樹 座間 信作 畑山 健 | 平成 15 年(2003 年)十勝 沖地震による石油タンク 被害 | 日本高圧力技術協会平 成 16 年度春季講演会 | 2004 年 5 月予定 |
| 西 晴樹 山田 實 廣川幹浩 | 平成 15 年十勝沖地震にお ける浮屋根式石油タンク の被害 | 第 34 回安全工学シンポ ジウム | 2004 年 7 月予定 |
| 山田 實 西 晴樹 廣川 幹浩 | 平成 15 年十勝沖地震にお ける固定屋根式石油タン クの被害 | 第 34 回安全工学シンポ ジウム | 2004 年 7 月予定 |
| 座間 信作 畑山 健 | 2003 年十勝沖地震でのや や長周期地震動と石油タ ンクのスロッシング | 第 34 回安全工学シンポ ジウム | 2004 年 7 月予定 |
| Shinsaku ZAMA | Liquid Sloshing of Oil Storage Tanks and Long-Period Strong Ground Motions in the 2003 Tokachi-oki Earthquake | 2004 ASME/JSME PRESSURE VESSELS AND PIPING CONFERENCE | 2004 年 7 月予定 |
| 西 晴樹 座間 信作 山田 實 畑山 健 廣川 幹浩 | 平成 15 年十勝沖地震に おける石油タンクの火災 とタンクの損傷について | 日本機械学会年次大会 | 2004 年 9 月予定 |
| 座間 信作 山田 實 西 晴樹 畑山 健 廣川 幹浩 | 平成 15 年十勝沖地震に おける石油タンク等危険 物貯蔵施設への影響 | 日本機械学会年次大会 | 2004 年 9 月予定 |

【表の説明】

表 1. 北海道内の石油タンク被害一覧 (2004 年 4 月 1 日現在)

表 2. 苫小牧西港地域の甚大な被害を受けたタンク

- 1) CR:原油 N:ナフサ K:灯油 S:スロップ
- 2) FRT:浮屋根式 CFRT:内部浮屋根式
- 3) 2次元スロッシング応答解析による最大波高

【図の説明】

図 1. 苫小牧で測定されたスロッシング波高

丸印は苫小牧西港地域、菱形は苫小牧東部地域のデータ。塗りつぶしは何らかの被害のあったことを示す。スロッシング固有周期 (T_s) が 7.6 秒の 2 つのタンクは内溶液が溢流。

図 2. 苫小牧地域の地震計設置地点

図 3. 苫小牧地域で得られた地震記録から求めた減衰 1%速度応答スペクトル

左: NS 右: EW 成分

図 4. 勇払、石狩平野での減衰 1%速度応答値のコンターマップ (周期 5、7、11 秒)

上: EW 下: NS 成分

図 5. 襟裳岬から勇払平野までの強震観測点分布と主な地点での減衰 1%速度応答スペクトル (黒線: NS, 灰色線: EW)

図 6. 襟裳岬から勇払平野に向けての 0.05~0.5Hz のバンドパスフィルターを通した速度波形

図 7. 苫小牧での石油タンクのスロッシング波高に関する測定値と 2次元応答解析結果との比較

丸印は苫小牧西港地域、菱形は苫小牧東部地域のデータ。塗りつぶしは何らかの被害のあったことを示す。実測値が 2.2m の 2 つのタンクは内溶液が溢流。

図 8. 苫小牧の全てのタンクに対して 2次元応答解析法で求められたスロッシング最大上昇量

丸印は苫小牧西港地域、菱形は苫小牧東部地域のデータ。塗りつぶしは何らかの被害のあったことを示す。黒丸は表 2 に掲げた甚大な被害を受けたタンク。

図 9. 110,000 kl タンク (表 2 のタンク A、B) の 2次元応答解析結果による東西断面の

液面変位

太実線：スロッシング 1 次モードが卓越、破線：2 次モードが卓越 薄実線：3 次モードが卓越

【写真の説明】

写真 1. リング火災（表 2 のタンク H）および配管からの火災の状況（札幌市消防局、9 月 26 日 7:00 頃撮影）。

写真 2. 全面火災の状況（表 2 のタンク C：9 月 28 日 12:30 頃、札幌市消防局撮影）

写真 3. 10 万 kl 原油タンク（表 2 のタンク A，B）の浮屋根が沈んでいる状況（札幌市消防局 9 月 30 日 9:30 頃撮影）

液面の白い部分は泡消火剤。タンクヤード内に原油漏洩の痕跡が認められる。

写真 4. 全面火災で変形したタンク C と浮き屋根が沈んだ灯油タンク D，E（10 月 4 日 16:00 頃札幌市消防局撮影）

写真 5. タンク D のポンツーン（浮き室）の下部デッキとアウターリム溶接部破断状況

写真 6. スロップタンク F（表 2 参照）の状況（9 月 29 日 16:30 頃撮影）

RC、K、CR は重油、灯油、原油で、容量 6 万 kl タンクである。

写真 7. タンク H（表 2 参照）のリング火災鎮火後の浮屋根の状況（9 月 27 日 17:00 頃撮影）

観測小屋は浮き屋根上に落下し、回転梯子と一緒に約 40 度時計回りに回転している。

写真 8. 石狩市のガソリンタンクの内部浮屋根の破損状況（石狩市消防本部撮影）

容量約 5,000 kl で内径 21m、スロッシング固有周期は約 5.0 秒、最大波高は約 3m。

写真 9. 容量約 11 万 kl タンクの浮き室とデッキ接合部の破断（約 3.3 m）