

# 緊急地震速報を用いた 石油タンクのスロッシングによる溢流量予測の可能性

Possibility of Real-Time Prediction of Liquid Sloshing of Oil Storage Tank  
Based on Earthquake Early Warning

○座間 信作<sup>1)</sup>, 西 晴樹<sup>1)</sup>, 山田 實<sup>1)</sup>, 廣川 幹浩<sup>1)</sup>, 遠藤 真<sup>1)</sup>, 目黒公郎<sup>2)</sup>  
Shinsaku ZAMA<sup>1)</sup> Haruki NISHI<sup>1)</sup>, Minoru YAMADA<sup>1)</sup>,  
Yoshihiro HIROKAWA<sup>1)</sup>, Makoto ENDO<sup>1)</sup>, and Kimiro MEGURO<sup>2)</sup>

<sup>1</sup>消防庁消防大学校 消防研究センター  
<sup>2</sup>東京大学生産研究所

National Research Institute of Fire and Disaster  
Institute of Industrial Science, University of Tokyo

For an efficient patrol to prevent and/or minimize secondary disaster such as fire breakout, diffusion of oil just after an earthquake, we investigated the possibility of real-time prediction of liquid sloshing of oil storage tank based on Earthquake Early Warning (EEW), and also investigated the estimation of volume of overflowed oil from a tank due to large liquid sloshing. As to velocity response spectrum prediction used in predicting liquid sloshing, we constructed the attenuation equation of spectral amplitude for far-field surface waves considering both the seismotectonics and the scaling law of the source characteristics. Then, we applied the attenuation equation to the EEW in the 2008 Iwate/Miyagi inland earthquake (M7.2) for Sendai Oil Industrial Complex District, and obtained a good agreement between the predicted and the observed spectrum. For estimation of the amount of overflowed oil, we executed experimental studies using a model tank of 7.6 m in diameter and proposed an empirical equation based on the velocity response spectrum and verified the validity of the formula for the past earthquakes. Thus, it is expected that the information about the predicted sloshing behavior in a very early stage after a large earthquake using EEW will be disseminated to person responsible for disaster countermeasures prior to communication congestion.

**Key Words:** *earthquake early warning, liquid sloshing, oil tank, overflow volume, efficient patrol*

## 1. はじめに

2003年十勝沖地震では、石油タンク火災2基、浮き屋根・浮き蓋沈没7基などの甚大な被害を被った。石油タンクのスロッシングによる被害を全くなくすことは、構造的耐震性を高めることで不可能ではないだろうが、現時点ではコスト的に成立しにくい。そこで、被害の軽減を図るための耐震強度向上等の予防的方法と併せ、効率的なパトロール等の応急対応を迅速に行うことによって、被害を極小化することが考えられる。そのためには、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することが要求される。ここでは、石油タンクのスロッシングによる被害（内溶液の溢流など）を取り上げ、緊急地震速報に基づく予測の可能性について検討した。

## 2. 石油タンクのスロッシングによる被害予測

2003年十勝沖地震での石油タンクのスロッシングによる2つの火災のうち、最初の火災は、浮き屋根が大きく揺動し、側板トップよりも高い所に設置された観測小屋等の施設に衝突したことが原因とされている<sup>1)</sup>。従って、スロッシングの最大波高が重要な情報となる。最大波高 $\eta^{(1)}_{\max}$ は近似的に以下の速度応答スペクトル法<sup>2)</sup>で与えることができる。

$$\eta^{(1)}_{\max} = \frac{D}{2g} \cdot 0.837 \cdot \frac{2\pi}{T_{s1}} Sv$$
$$T_{s1} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{1.841g} \coth\left(\frac{1.841H_L}{R}\right)}$$

ここで、 $T_{s1}$ 、 $R$ 、 $H_L$ 、 $g$ はそれぞれスロッシング1次固有周期、タンク半径、液高、重力加速度である。上式か

ら分るように、波高の算出にはタンクの諸元（タンク直径、液高）と速度応答スペクトルが与えられれば良い。

2つ目の火災は、大きな揺動により過大な力が浮き室（ポンツーン）に加わり、ポンツーンの一部が破断し、大量のナフサが浮き屋根上に流出したため、浮き屋根が沈没したことが元となっている。スロッシングによりポンツーンにかかる応力の算出は Yamauchi et al. (2006)<sup>3)</sup>に与えられている。ここでは紙数の関係から省略するが、ポンツーンに働く応力は、タンク諸元（ポンツーン諸元、タンク直径、液高）と速度応答スペクトルが与えられれば算出でき、ポンツーンが破断するか否かの判断が可能となる。

一方、忘れてならない被害として、内容液の溢流があげられる。特に第一火災においては、溢流した原油がタンクヤード内で燃え、その後の消防活動に影響を及ぼした。従って、溢流量算出が要求されるが、研究例は殆どない。ここでは、著者らが行った速度応答スペクトルに基づいた溢流量算出方法に関する実験的検討結果<sup>4)</sup>を以下に示す。

防災科学技術研究所の振動台を用いて、直径7.6mの模型タンクの揺動実験を行った。手順は、

- (1)  $Sv$ を求めるため、減衰定数 $h$ を測定する。
- (2) 振動台の変位を測定し、 $Sv(h)$ を求める。
- (3) 入力地震波の強さを変え、最大波高 $\eta^+$ を測定する。
- (4) 最大波高 $\eta^+$ と速度応答スペクトル法から求まる線形解 $\eta^{(1)}_{\max}$ との関係を求める（非線形の補正）。
- (5) 液高を変え、溢流実験を行い、溢流により減少した液レベルを測定し、溢流量 $V$ を求める。
- (6) 最大波高 $\eta^+$ から得られる $\delta h$ と $V$ との関係を求める。
- (7) 入力地震動、液高を変えて(1)から(6)を繰り返す。

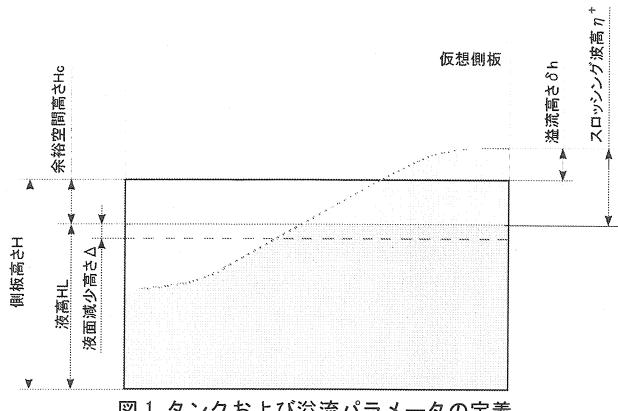


図1 タンクおよび溢流パラメータの定義

(8) 同様に浮き屋根のある場合について、(1)～(7)を繰り返す。

図1にタンク諸元と溢流高さなどのパラメータを模式的に示す。

実験から、溢流量は、図1で示されるタンク高さより上側の体積 $\delta v$ に比例するものとすると、無次元液面減少高さ $\Delta/R$ は $\delta v/R^3$ の1次式で近似的に表すことができ、自由液面の場合の比例係数が 0.659 で、浮き屋根有の場合が 0.4023 となる。 $\delta v$ は速度ポテンシャル理論(線形)と非線形項(実験式)とで表わされる液面形状から求めることができる。なお非線形項は、タンク中心からの半径方向長さを  $r$  とすると実験的に  $0.91 r \left( \frac{\eta_{\max}^{(1)}}{R} \right)^2$  で与えられる。

この算定式を過去の溢流事例(1964年新潟地震、1983年日本海中部地震、2003年十勝沖地震)に当てはめたところ、10%程度の誤差範囲で推定でき、有効性が確認された。

以上から、スロッシング最大波高、ポンツーン被害、溢流量に関しては、速度応答スペクトルを用いることで算出可能となることが分かる。従って、本研究の目的である緊急地震速報に基づいた被害予測の可能性に関しては、精度の高い速度応答スペクトルを求めることができるとかにかかっていると言つてよい。

### 3. 緊急地震速報を用いた速度応答スペクトル予測

緊急地震速報のうち、高度利用者向けは、震央、深さ、地震規模(M)、決められた地点の予測震度、到達予測時刻からなり、日々刻々発表される。地震動の強さの一指標である震度は、Mと震源距離Xの関数として与えられる距離減衰式を用いて算出される工学的基盤における最大速度に地表地盤の増幅度を乗ずることで地表での最大速度を計算し、震度に変換することで与えられる。

一方、石油タンクのスロッシングの励起に係わる長周期地震動に対する距離減衰式については、研究例が極めて少ない。ここでは、座間(2000)<sup>5)</sup>が提案している手法を採用する。そこでは、長周期地震動が主に表面波から構成されているとし、その励起(震源)と伝播経路の影響を考慮することが必要という認識に基づき、地震地体構造区分ごとに地震記録を分析して距離減衰式を与えていた。

この距離減衰式の妥当性を検討するため、2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)時の緊急地震速報を用いて、仙台JMAの気象庁1倍強震計記録に基づく予測速度応答スペクトルと、仙台地区コンビナートでの観測スペクトルとの比較をしてみた。

図2は第1報(地震発生後9.2秒)から第10報(68.6秒)までの情報に基づいて算出した速度応答スペクトルと観測値との比較である。第1報はMが小さいため、最終報と比べて  $S_v$  は1桁小さくなっている。第8～10報に基づく予測スペクトルは、観測値とは周期6～7秒を除きほぼ一致する。この相違の要因としては、予測が地震観測点(仙台塩釜港北側)から約10km西の気象台に対してであり、両地点で地下構造の違いに起因して地震動特性が異なることが考えられるが、今後の検討を必要とする。

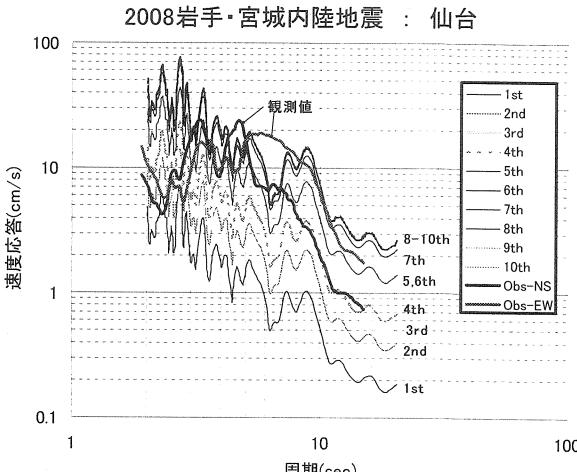


図2 岩手・宮城内陸地震での緊急地震速報に基づく仙台JMAでの予測スペクトル(第1報から10報)と仙台コンビナート地区での観測スペクトル(観測値)との比較

### 4. おわりに

1 地震に対して何度か発表される緊急地震速報のごく初期の情報は、この例ではスロッシング予測を過小評価するため用いることはできないが、第10報(最終報)であれば、相当の精度で予測が可能であると考えられる。しかも、最終報であっても、発震の1分後程度の遅延であることから、通信の輻輳に巻き込まれる恐れはほとんどないと考えられる。従って、緊急地震速報を用いる場合には、最終報あるいは10報を目途として利用することが考えられる。なお、長周期地震動といえども、数km離れた地点間で大きくその特性が異なることもあるので、予測に用いる距離減衰式はタンクサイトでの地震観測記録に基づくことが望ましいことは言うまでもない。

本研究の一部は、文部科学省「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」で実施された。

### 参考文献

- 1) 西晴樹、横溝敏宏：出光興産(株) 北海道製油所原油タンク火災に係る調査概要について、消防研究所報告、100, pp. 59-63, 2006
- 2) 坂井藤一：円筒形液体タンクの耐震設計法に関する2,3の提案、圧力技術、18, pp. 16-23, 1980
- 3) Yamauchi, Y., K. Kamei, S. Zama, and Y. Uchida: Seismic Design of Floating Roof of Oil Storage Tanks under Liquid Sloshing, PVP2006-ICVT-11, ASME, 1-9, 2006
- 4) 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、46-5, pp. 276-284, 2008
- 5) 座間信作：やや長周期帯域における加速度スペクトルの半経験的表現、消防研究所報告、89, pp. 1-10, 2000