



石油タンクのバルジング固有周期の実測

消防庁 消防研究センター
畑山 健

1. はじめに：バルジングとは？ バルジング固有周期とは？

石油コンビナート地域にあるような石油タンクが地震動（地震時の地面の揺れ）に見舞われると、地震動の短周期成分の作用により、石油タンクの側板とタンク内部の液体（石油）の連成振動（「流力弾性振動」とも呼ばれます）が生じます。この振動は、単純なはり理論で扱われるようなタンクの水平方向の断面（円形など）の形状が保持された状態で側板がたわむというのではなく、膨らみなどの断面変形を伴うものであることから、坂井・迫田（1975）は「バルジング」（bulge：膨らむ）と名付けました（図1参照）。バルジングが起きると、タンクには転倒モーメントが発生し、その影響で、側板が座屈したり、タンク本体が片浮き上がりしたりするおそれが生じます。1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災、M7.3）、2018年北海道胆振東部地震（M6.7）、2022年3月16日の福島県沖の地震（M7.4）では、容量数百kLクラスの大口径型石油タンクの側板に座屈が発生（図2）しましたが、これらはバルジングに起因するものと考えられます。また、1978年宮城県沖地震（M7.4）では、仙台市内の製油所において、3基の大型重油タンクの底部隅角部にき裂が生じ、3基合わせて全量約68,000kLの重油が流出するという甚大な被害が発生しました（図3）。このき裂発生は、バルジングが発端となってタンク本体に生じた片浮き上がりが一因となっているものと考えられています。このように、「バルジング」は地震時に石油タンクに大きな被害をもたらす現象で、その評価は耐震設計上、また被害予測上たいへん重要なものです。

一般に、物体の振動現象においては、物体が自由振動する周期（「固有周期」といいます）と同じ、またはそれに近い周期特性を有する外力をその物体に加えると、物体が大きく振動するという性質があります（「共振」といいます）。石油タンクでも同様で、石油タンクは、バルジングの固有周期と同じ、またはそれに近い周期特性を有する地震動で揺られると、大振幅のバルジングが生じ、側板の座屈やタンク本体の浮き上がりの原因となる転倒モーメントも大きなものとなります。したがって、バルジング、ひいては短周期の地震動による石油タンクの被害をきちんと評価する上では、まず、バルジング固有周期をきちんと評価することがきわめて大事になります。

他の物体の振動現象と同様、円筒縦置き型タンクのバルジングにもいろいろな振動モードがありますが（図4）、これらのなかで、鉛直方向次数1、円周方向波数1の基本モードと呼ばれるモードが、転倒モーメントの評価上、最重要であると考えられています。この基本モードのバルジングの固有周期を簡便に算定する式は坂井・小川（1979）により提出され（「坂井・小川の式」と呼びます）、その算定式は、石油タンクの耐震基準を定めた消防法令（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）に、ほぼそのまま採用されています。その算定式は、告示においては次のように表記されています。

$$T_b = \frac{2}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{W}{\pi g E t_{1/3}}} \cdot j$$
$$\lambda = 0.067(H/D)^2 - 0.30(H/D) + 0.46$$

上式で、 T_b は基本モードのバルジングの固有周期（s）、 H は液面高さ（m）、 D はタンクの内径（m）、 W は内容液の重量（kN）、 g は重力加速度（ m/s^2 ）、 E はタンク材料のヤング率（ N/mm^2 ）、 $t_{1/3}$ はタンク底部から液面高さの1/3の高さにおける側板の板厚（mm）です。 j は基礎及び地盤とタンク本体との連成の影響を考慮するための補正係数で、四種地盤上に設置されたタンクに対しては1.1、それ以外のタンクに対しては1.0とされています。坂井・小川の式には、この補正係数は含まれていません。

この算定式の精度については、疑義を呈する研究論文も出されていました。大町・谷田（1998）は、鋼製円筒縦置き型石油タンクの固有周期を常時微動（常時発生している微小な振動）の計測から実測することを試み、実測された固有周期

が坂井・小川の式による算定値に比べて3倍以上も長いということを主張しました。この主張が妥当だとすると、消防法令で定めている石油タンクの短周期地震動に対する耐震基準の信頼性が損なわれかねません。このようなことから、私ども消防研究センターでも、坂井・小川の式の精度、信頼性を改めて検証するため、鋼製円筒縦置き型タンクのパルジング固有周期を、大町・谷田(1998)と同じく、常時微動の計測から実測することを試みました。

2. 石油タンクのパルジング固有周期の実測方法と結果

パルジング固有周期実測のための常時微動の計測は、日本国内にある直径82m、高さ27.3m、容量125,000kLの円筒縦置き型浮き屋根式工業用水タンクで実施しました。タンクには、図5に示す3箇所(B:基礎犬走り上、M:側板中ほど、T:側板最上部)に3成分の小型のサーボ型速度センサーを設置または取り付けて計測を行いました。計測時の液面高さは23.0mでした。この計測から得られた最も重要な結果を図6に示します。図6は、3成分のうちの半径方向成分について、B点に対するM点の常時微動のフーリエ振幅スペクトル比を示したのですが、顕著なピークが5つ認められます(Peak1~5)。別途、有限要素法による固有値解析を行い、その結果と常時微動計測データを照合したところ、これらの5つのピークのうちのPeak1が基本モード(鉛直方向次数1、円周方向波数1;図4参照)に対応すること、Peak2~5は、それぞれ、鉛直方向次数が1で、円周方向波数が2~5のモード(図4参照)に対応することがわかりました。これにより、このタンクでの基本モードのパルジング固有周期の実測値は0.45s(固有振動数2.21Hzの逆数)ということになりました。一方、坂井・小川の式による算定値は0.41sとなり、実測値とよく合っています。また、別の日に実施した常時微動計測(このときの液面高さは23.5m)での実測値は0.45sであったのに対して、坂井・小川の式による算定値も0.45sとなり、両者が一致しました。

3. まとめと今後のことなど

上述のとおり、今回常時微動を計測したタンクについては、基本モードのパルジング固有周期の実測値と坂井・小川の式による算定値がよく一致し、坂井・小川の式に十分な精度と信頼性があることを確認することができました。また、今回のような検討を自ら行うことにより、大町・谷田(1998)は、今回の計測データでいえば、Peak5のような最も低い周波数(最も長周期側に)に現れるピークが基本モードであるという誤った解釈を行ったために、坂井・小川の式の精度について疑義を呈する主張を行うことになったのではないかという考えにも至りました。今回の結論をより確かなものとするため、また、タンクの短周期地震応答への理解をより深めるため、異なる大きさのタンクでのパルジング固有周期の実測が必要と考えています。

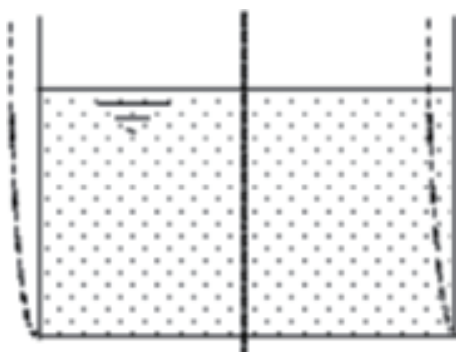


図1 パルジングの模式図
(膨らみなどの断面変形は描かれていない)

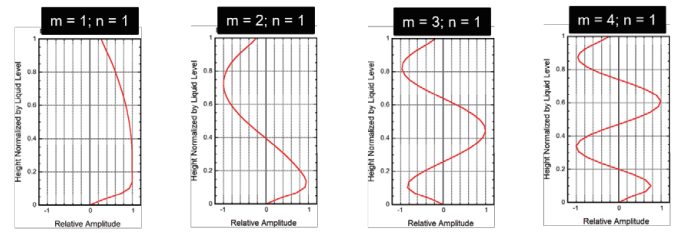


図2 1995年兵庫県南部地震の際に発生した石油タンクの側板座屈



図3 1978年宮城県沖地震の際の仙台市内の製油所における重油の大量流出 (河北新報社撮影)

鉛直方向次数 m



円周方向波数 n [円周方向に $\cos(n\theta)$ の振幅分布]

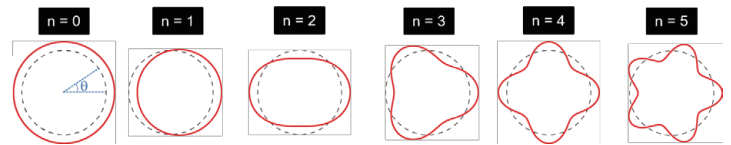


図4 パルジングのモード (一部; $m=n=1$ のモードが基本モードと呼ばれる)

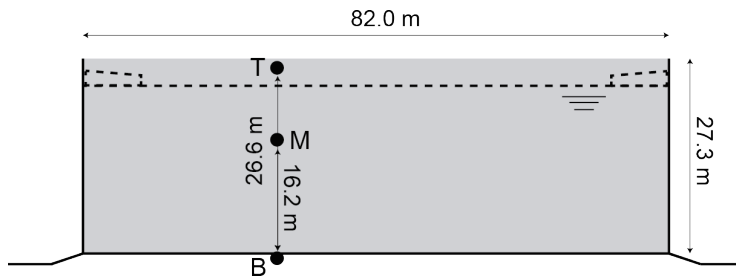


図5 常時微動計測対象タンクにおけるセンサー配置

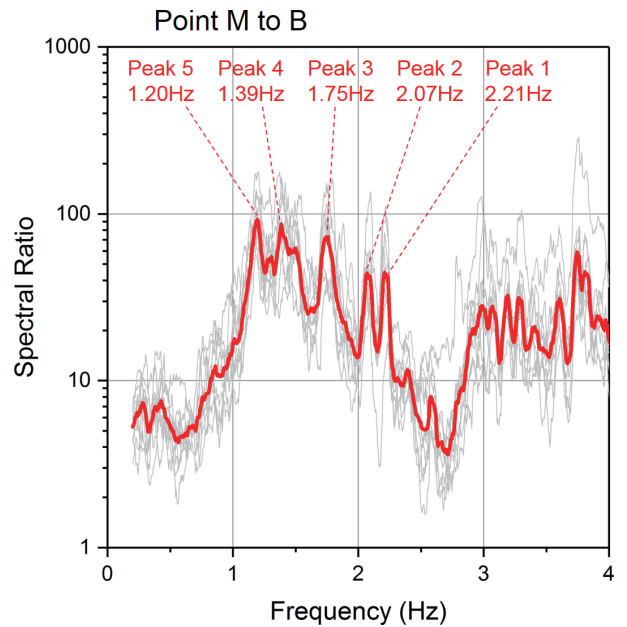


図6 B点に対するM点の常時微動のフーリエ振幅スペクトル比 (半径方向成分)