

新潟地震にもなう油タンク火災の出火原因等の調査研究

堀内三郎・秋田一雄・中久喜厚・宮田作

消防研究所

A Study on the Cause of the Fire in a Huge Petroleum Tank soon after the Niigata Earthquake

By S. Horiuchi, K. Akita, A. Nakaguki and S. Miyata

Fire Research Institute, Ministry of Home Affairs, Tokyo

Abstract

In order to make clear the cause of the fire in a huge petroleum tank which broke out soon after the Niigata Earthquake, the field investigations and the vibration-tests were carried out, using a one-twentieth size model of the tank. The results of the experiments are: 1) The resonance frequency obtained by the experiments is almost equal to that calculated by the theoretical equation, and therefore it will be determined simply by two factors, i.e. the diameter of the tank and the depth of the liquid. 2) The method to calculate the maximum resonance amplitude is now under investigation. 3) In accordance with the evidences of some eyewitnesses, obviously the big rolling motion of the floating-roof and the overflow of a large quantity of petroleum should have occurred, and undoubtedly some parts of the floating-roof should have clashed upon the sidewall of the tank.

1. 昭和石油 K. K. 新潟精油所における油タンク火災の原因調査

昭和39年6月16日午後1時頃、新潟地方を襲った大地震にもなない、同市の昭和石油 K. K. 新潟精油所内の大規模な石油タンクから出火し、大火災となった。その出火原因および延焼拡大要因などを詳しく調査し、再び同様な災害を蒙らないようにするための対策を確立することを目的として、地震発生の直後と約3ヵ月後の2回にわたり、それぞれ数日間づつ現地調査を行なった。その調査結果については、すでに他の資料⁽¹⁾にも発表されているので、詳細についてはそれらを参照していただくこととし、ここでは次に、その要点のみを摘記することにする。

a) 地震発生の直後に出火したのは、昭和石油新潟精油所の構内の「新工場」と呼ばれていた地区にあった呼称3万kl入りの原油貯蔵用浮屋根式タンク(直径51.5m, 高さ14.5m)で、同じタンクヤード内に建ち並んでいた

5基の巨大なタンク群のうちの、最も西北端に位置するNo. 1103 というタンクであった。

b) 出火時刻は6月16日午後1時02分から1~2分の間と推定され、地震動によりタンクの浮屋根が大きく揺れ、そのたびに原油が溢れ出たが、その3~5回目(正確な回数は不明)の溢流の際、出火したといわれている。

c) 出火原因については、第1にタンクの動揺による摩擦または衝撃時の熱による引火説、第2に原油の運動による静電気火花説、第3に攪拌用電動機などの電気配線の短絡火花説の三つの説が推定原因として考えられているが、未だそのいずれとも断定できない状況である。

2. 模型石油タンクの振動実験

2.1 実験の目的

新潟地震の直後に発生した大規模石油タンクの出火原因については、前記のように三つの説があるが、現在そのいずれとも断定できない状況である。しかし、地震に

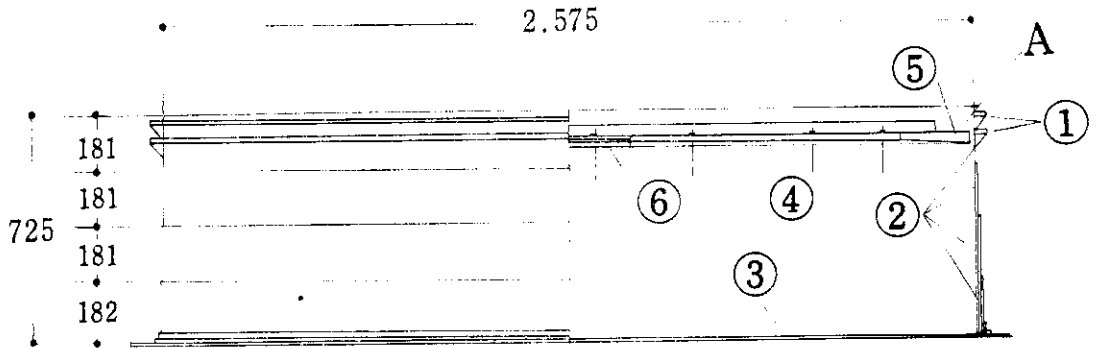
よるタンクや原油の大きな動揺が、出火原因と密接な関係があることは明らかであるので、実験装置および費用の許す範囲内で、できるだけ大きな模型を作り、次に記す諸点の究明を目的として振動実験を行なった。

- a) 円筒容器中に水を入れて振動を与えた場合の液面の運動状態に関する理論式⁽⁹⁾が実大規模の石油タンクの場合にも適用できるかどうかを確かめること。
- b) 前記 a) に関連して、特に水の場合と原油の場合とで如何なる相違があるかを明らかにすること。

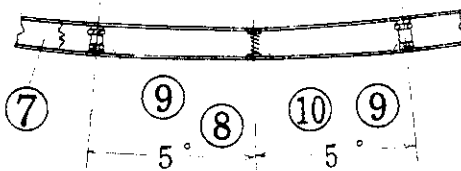
- c) 如何なる条件の場合に、原油がタンクの側板を越えて溢れ出るか、その条件を明らかにすること。
- d) 新潟地震の際の地盤の振動記録から推定される振動条件で加振した場合、共振現象を生ずる可能性があるかどうか、もしありとすればその時の浮屋根と側板との衝突や摩擦などの現象ならびに原油の溢流現象などを明らかにすること。

2.2. 実験装置および供試体

2.2.1 実験装置(振動装置)



A部詳細(平面)
Detail of A(plain)



凡 例

- ① ウインド ガーダー Wind guarder
- ② 外 側 板 Wall plate
- ③ 底 板 Bottom plate
- ④ 浮屋根 デッキプレート Deck plate of floating roof
- ⑤ 浮屋根 ポンツーン Pontoon
- ⑥ センター ウェイト Center weight
- ⑦ ファブリック Fabric
- ⑧ シュー プレート Shoe plate
- ⑨ ハンガー Hanger
- ⑩ プッシャー Pusher

A部詳細(断面)
Detail of A(Section)

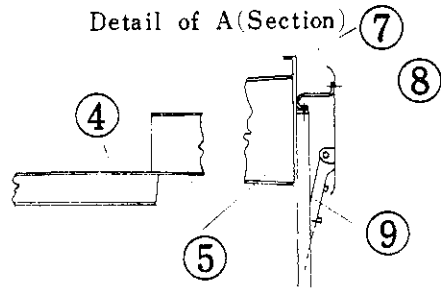


図-1 模型タンク略図(単位mm)
A model of petroleum tank (in mm).

実験に用いた振動装置は、消防研究所構内の屋外実験場の一部に設けられた振動台およびその加振装置で、その規模、性能などの主要点は次のとおりである。

振動台：大きさ 3 m × 3 m，自重約 2 トン，最大塔載荷重 5 トン

加振方法：水平方向，可変偏心型クランク加振方式

振動数：低速 0.1～2 c/s，高速 2～10 c/s，2 段切替，各段共運転中連続可変

振幅：0～200 mm，運転中連続可変

最大加振力：1400 kg × g

最大振動加速度：無負荷のとき ±0.7 g，最大 5 トン載荷のとき ±0.2 g

2.2.2 供試体

昭和石油新潟精油所において、地震の直後に出火した No. 1103 の原油貯蔵用浮屋根式 3 万 kl 入りタンクの 1/20 模型を特に設計して製作したものである。全体は薄鋼板製で、その大略寸法と形は図-1 に示すとおりである。模型の設計製作に当っては、できる限り忠実に実物の 1/20 になるように努めたが、材料および工作技術の点で省略または近似的寸法によらざるをえない場合には、全体としてのバランスを保つように考慮した。特に、浮屋根の外縁端がタンク側板に接触する「メタルシール部分」については、できるだけ精密に製作した。なお、この模型タンクに水を満水し、浮屋根を入れない状態で加振し、タンク側板頂部における歪を測定した結果、その歪量は極めて小さいことが明らかとなったので、以下の実験においては、模型は一つの剛体とみなして、側板の歪の影響は無視することにした。

2.3. 水面の振動実験

2.3.1 実験方法

まず、最も基本的な場合として、模型タンク内に浮屋根を入れず、水のみを入れて加振した場合の自由水面の運動状況を明らかにすることにした。水面の測定点としては、タンクの水平振動方向の直径上に、図-2 に示すように 4 点を選び、各測定点ごとに固定した 2 本ずつの平行な電極棒間に、図-2 に示すような回路を組んで直流 15 V の電圧を与え、水位の上下運動による電気抵抗の変化を直記式電磁オシログラフにより記録させる方法を用いた。なお、模型タンクの内面には合成樹脂塗料を塗布して電気的絶縁をはかった。この水位測定装置の検出部の水位と電気抵抗値との関係を表わす特性曲線はほぼ直線状で、実験上十分な精度と認められた。（特性曲線の図は省略）

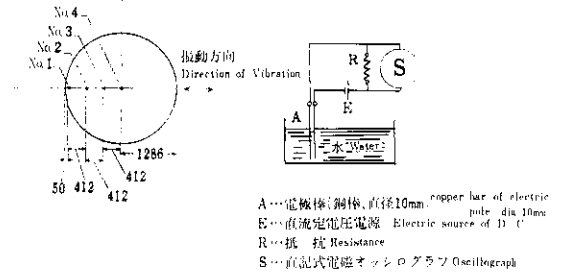


図-2 変位測定位置および水位測定用装置回路図 (単位 mm)

Positions of measuring points and the circuit for recording the displacements of water surface (in mm).

実験の方法としては、水深を満水時の深さ 725 mm を 100% として、その 90% から 10% おきに、80%, 70%, ..., 20% まで 8 段階に変化させ、その各場合について振幅は一定値をとり（水深 50% 以下の場合には振幅 20 mm，その他の場合は 10 mm），振動数を 0～100 c/min の範囲で変化させ、特に共振現象を生ずると思われる振動数の付近では振動数の値を細かく変化させて、各測定点における水面の運動状況，すなわち，振動波形，振幅および周期を測定した。

2.3.2 実験結果

a) 液面変位の時間的変動

代表的な測定例を図-3 に示す。同図は水深が 50% の場合の例で、①は共振に近い状態のもの、②は共振していない状態のものであり、また①②③などの番号はそれぞれ No. 1, No. 2 および No. 3 などの測定点の位置を表わしている。全般的にみて、タンク側板に近い No. 1 の方が正弦波形に近い整った波形を示し、No. 2, No. 3 のように中心に近い位置になると乱れた複雑な波形を示すようになる。また No. 1 の方が変位も大である。同様に、共振時に比べ、共振しない時の方が、変位は小であるが波形は整っている。さらに、同図の(イ)①では中心位から上方への変位の方が下方への変位に比べ大であるが、この傾向は水深が小となるほど強く現われる。このような波形の乱れ現象は、タンクの側板および底板の影響によるものと思われる。

b) 共振振動数と最大変位

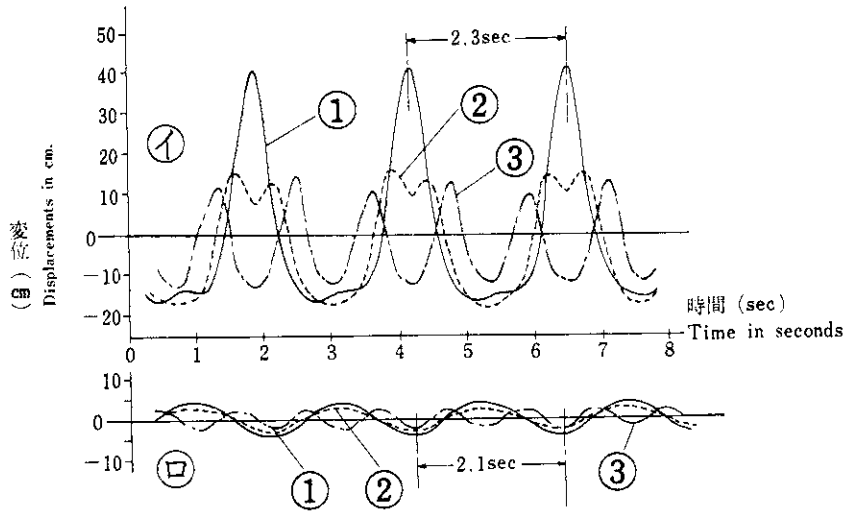


図-3 自由水面の振動（変位の時間的変動）
水深 36.2 cm (50%), 振幅 20 mm の場合

- ① 共振時, 振動数 = 26 c/min
- ② 非共振時, 振動数 = 28.2 c/min

Vibration waves of free water surface.

(a) : Resonance

(b) : Non-resonance

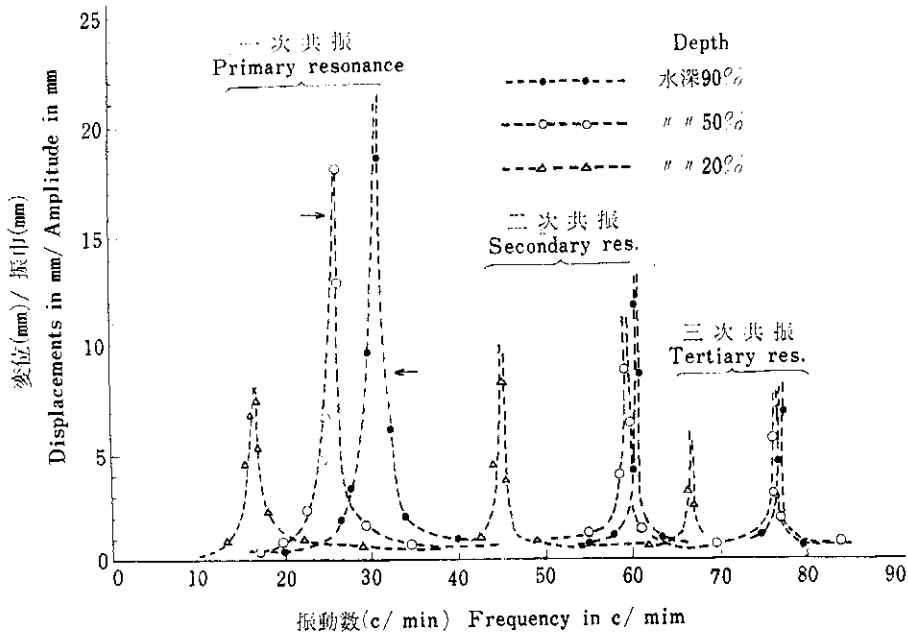


図-4 自由水面の振動（振動数—変位/振幅）

No. 1 測定点（最外側）における値 矢印は側板頂上の位置を示す
Vibration of free water surface.

起振機の振幅を一定に保って、振動数のみを変化させた場合の変位と振動数との関係を求めてみると、図-4 のようになり、水深によって決まるある特定の振動数において最大の変位を示し、共振現象が起っていることがわかる。また、この共振振動数は水深が大なるほど多くなるが、その結果を表-1に示す。さらに、図-4のよ

表-1 一次共振点における共振振動数 (c/min) と液の深さ

Resonance frequency (in c/min) at the primary resonance point and the depth of liquid.

液の深さ (%)	液の深さ (cm)	自由水面 (ふたなし)	自由油面 (ふたなし)	浮屋根 (原油)	計算値 (自由水面)
20	14.5	16.5	16.2	15.0	16.2
30	21.8	19.5	20.0*	20.7	20.0
40	29.0	22.0	22.0*	---	22.4
50	36.2	25.2	26.1	23.1	25.0
60	43.5	26.4	---	---	26.6
70	50.8	27.8	---	---	28.1
80	58.0	29.3	---	---	29.3
90	65.3	30.5	---	30.5**	30.6

注 計算値は理論式(2)より計算した値

— 印は測定しなかったもの

振幅は 20mm, ただし自由水面の60%以上の場合は 10mm とする

* 印は起振機のメーターの読みの値, その他は測定した振動波の周期より求めた振動数

** 印は16ミリ高速度 (64コマ) カメラの撮影したフィルムをフィルム解析機により求めた値

うに、ある一つの測定点についてみると、共振振動数は第一次のほか第二次、第三次のものも現われるが、高次のものほど振幅が小さい。しかし、また別の測定点についてみると、第二次または第三次の共振点で、かえって大きな変位を示す場合もある (図は省略)。しかし、災害防止の見地から、タンクからの溢流という点について考えると、側板に最も近い点の変位が問題となるので、第一次の共振点における最大変位が最も重要ということになるわけである。この最大変位と水深との関係を図-5に示す。ただし、今回の実験で水深が30%を越える場合には、共振時に上昇した水面が側板の高さ以上に達し、水の一部が側板より外へ溢れ出したために、最大変位として測定できた値はかなり低いものとなった。(図-4、図-5)

2.4. 油面の振動実験

2.4.1 実験方法

前節の自由水面の場合と比較する意味で、模型タンク内に水の代りに原油を入れ、浮屋根はいれなくて加振した場合の自由油面の運動状況を明らかにすることにした。なお、使用した原油は、新潟地震の際の出火タンク

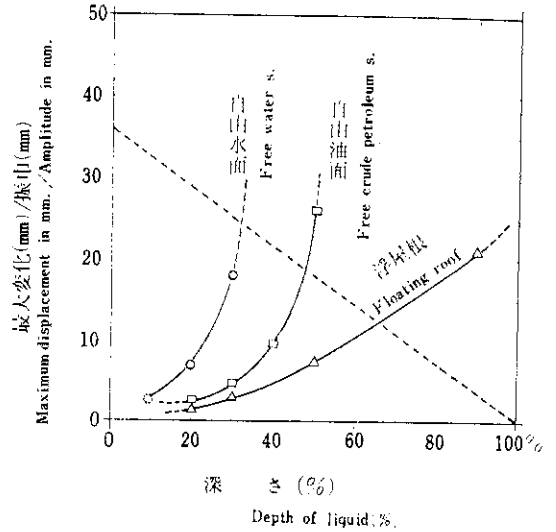


図-5 液の深さと最大変位との関係

図のうち…斜線より右上方は変位がタンクの側板頂部より上方の位置にあることを示す。

Depth of liquid vs. maximum displacement. Dotted line shows that the overflow of liquid is situated above the top of the wall plate of the tank.

内にあったものと同種類のカフジ産原油を、昭和石油K Kの好意により入手したものである。測定点は前節の水面の場合と同じであるが、原油は水と異なり、電気的不良導体であるため、油面の変位を測定するのに前節の方法は使用できない。そこで図-6に示すように、コルク製の浮子を用い、その上に立てた支柱が油面の上下運動につれて垂直方向に上下するようにし、その支柱の上端に取りつけた豆電球の光を、レンズを通して回転する円筒上の印画紙に感光させて記録する方法を用いた。その際、レンズの光軸方向をタンクの振動方向から少しずらせて、各測定点ごとの電球の映像が印画紙上で重ならないようにした。時間目盛は一定の時間間隔で点滅する固定した電球からの光を利用し、また変位の量はあらかじめ相互間隔が測定してある二つの電球からの光を用いて、それぞれ印画紙上に同時に記録する方法を用いた。

実験の方法も大体は前節と同様であるが、今回の油の場合は各種の制約があって、ある程度簡略にせざるをえなかった。すなわち、振幅は全部 20 mm の一定値を用いることにし、振動数も予想される共振時の振動数の前後のみについて変化させて行ない、また油の深さも最大深さに対する % で表わして、50%、40%、30% および

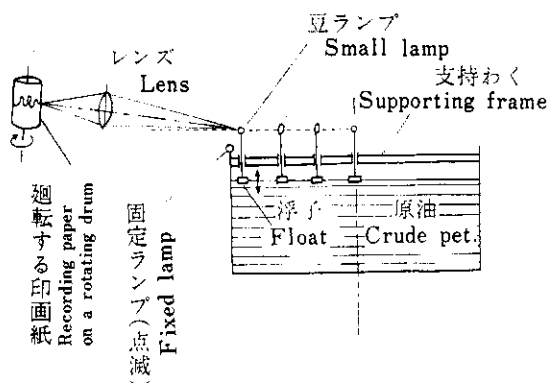


図-6 油面の変位測定装置略図
Schematic diagram of recording apparatus of the displacement of petroleum surface.

20%の四段階についてのみ行なった。これは、油の深さが50%をこえるとタンクの側板を越えて大量に溢流するおそれがあり、危険が伴うことを考慮したためである。

2.4.2 実験結果

a) 液面変位の時間的変動

代表的な測定例を図-7に示す。図は油面が50%の場合の例で、①は共振に近い状態のもの、またⓐは共振していない状態のもので、①などの記号の意味は前節と同じである。同図と前節の水の場合の図-3とを比べてみると、全般的には大体よく似た傾向を示しているが、波形の乱れや、上下方向の変位の差異などの点は一段と著しくなっていることが認められる。

b) 共振振動数と最大変位

前節と同様に、起振機の振幅が一定(20mm)の場合における変位と振動数との関係を図-8に示す。また同図から明らかになった共振時における振動数と油の深さの%との関係を表-1に併記して示した。さらに、溢流の危険がある側板に最も近い No. 1 の測定点における最大変位と油の深さの%との関係を、前節と同様に図-5に示した。実験の結果によれば、振幅が20mmの場合におけるこの模型タンクから油が溢流する危険は、油面の深さが40%を越えた場合に生ずることがわかった。

2.5 浮屋根の振動実験

2.5.1 実験方法

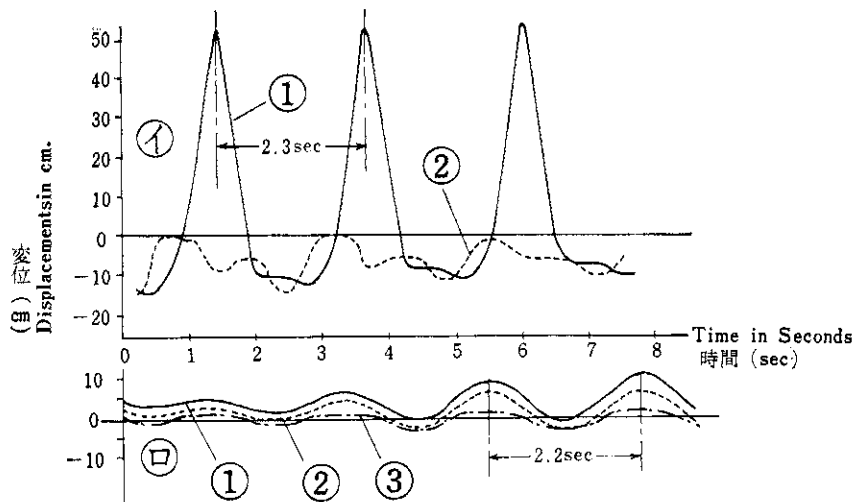


図-7 自由油面の振動(変位の時間的変動)

深さ 36.2 cm (50%) 振幅 20 mm の場合

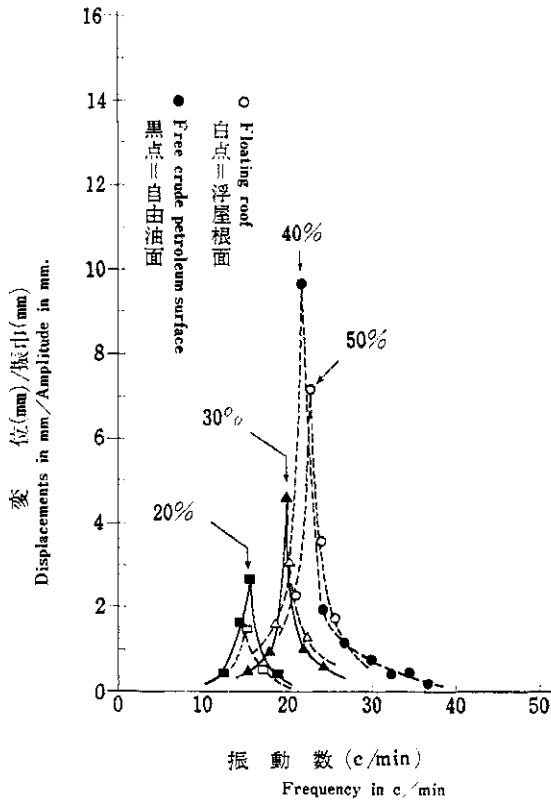
① 共振時, 振動数 = 26.1 c/min

ⓐ 非共振時, 振動数 = 27.3 c/min

Vibration waves of free crude petroleum.

(a) : Resonance

(b) : Non-resonance



図—8 自由油面および浮屋根の振動
(振動数-変位/振幅)

[No. 1 測定点における第一次共振]
Vibration of free crude petroleum surface
and floating-roof.

最後に、模型タンクに原油を入れ、その上に浮屋根を浮べた場合について振動実験を行ない、浮屋根の運動状況および原油が溢流する現象について調べた。この場合、浮屋根は一体としての運動をするので、測定点としては最も変位が大と予想される側板に近い位置1ヵ所を選定し、また測定方法は前節の油面の場合と同じ方法によった。ただし変位を示す豆電球は浮屋根の前記測定点の位置に固定して立てた支柱上に取りつけた。そのほか、タンクの各部分の衝突、摩擦および溢流などの現象を記録するため、普通のカメラのほか、16mm 高速度撮影機(64コマにて撮影)および8mm カラーフィルムによる撮影を併用した。

2.5.2 実験結果

a) 変位の時間的変動

実験結果の代表的な例を図—9に示す。同図の④は深さ50%の場合、また③は深さ30%の場合における、それぞれ共振に近い状態のものであるが、自由水面や自由油面の場合と異なって、波形の上下非対象もなく、きれいな正弦波形を描いている。また、変位は前節と同じく、深さが大きくなるほど増大するが、変位の値そのものは自由油面の場合よりかなり小さくなっている。しかし共振時における周期は自由油面の場合とほとんど変わらず、専ら深さのみによって変化するものであることが示されている。

b) 共振振動数と最大変位

前と同様に、起振機の振幅を一定(20mm)にした場合の変位と振動数の関係を前の図—8に併記した。同図からみられるように、変位が鋭いピークを示す点が共振点であることは容易にわかるが、その場合の共振振動数は自由油面の場合のそれとほとんど変わらないこと、しかしその場合の最大変位量は同じ油の深さの場合における自由油面のそれに比べて小さい値を示すことがわかる。これらの関係を表—1および図—5に示した。これらからみると、浮屋根のある場合の油の溢流する危険は、油面のみの場合より一そう安全側にあることがわかる。

2.6. 実験結果の検討

2.6.1 共振振動数

共振時の振動数については、前にも記したとおり、波の深さのみ関係し、自由水面でも、自由油面でも、また浮屋根のある原油の場合でもほとんど変化しないことが実験の結果明らかになった。その関係は表—1に示すとおりである。

この共振時の振動数については、千田・中川両氏の研究⁽²⁾による容器内の水の速度ポテンシャルの関係から導かれた理論式があり、それによれば共振振動数 n は次式で与えられる。

$$n = (60/2\pi) \sqrt{g(\gamma_n \cdot a)/a \cdot \tanh(\gamma_n \cdot a)/a \cdot H}$$

ここに、 n : 振動数 (c/min)

a : 半径 (m)

H : 水深 (m)

g : 重力の加速度 = 980 (cm/sec²)

γ_n : 第一次共振の場合 = 1.841

第二次 " " = 5.332

合三次 " " = 8.536

上式を用いて、今回の模型タンクの場合の共振振動数を計算してみると、表—1の最右欄に記した値を得る。(第一次共振の場合)

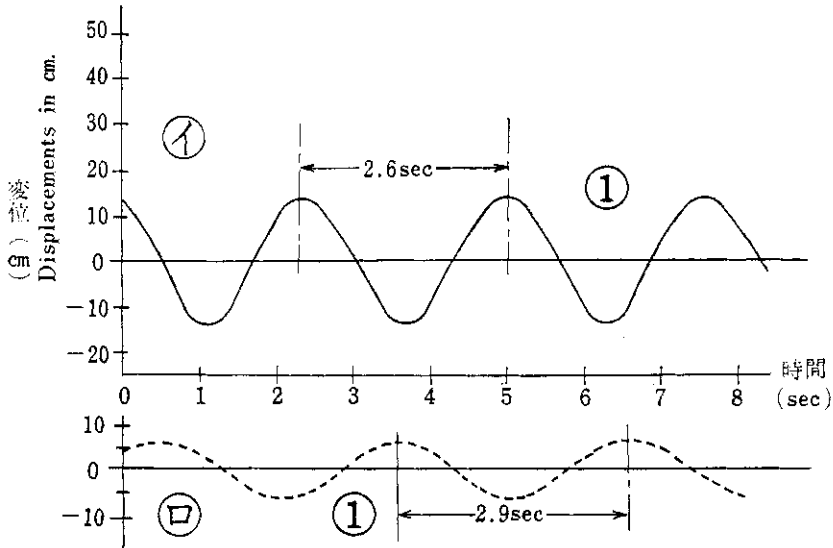


図-9 浮屋根の振動（変位の時間的変動）

振幅 20 mm の場合、No. 1 測定点

① 深さ 36.2 cm (50%) の場合の共振時。振動数=23.1 c/min

② 深さ 21.8 cm (30%) の場合の共振時。振動数=20.7 c/min

Vibration waves of floating-roof.

(a) : Resonance

(b) : Non-resonance

以上の結果を総合すると、共振振動数に関しては、表-1にみられるように、前記の理論式から求めた値と、各実験値とは大体よく一致するということができる。したがって、実物大の油タンクの場合にも、その半径と油の深さが与えられると、浮屋根式であっても、そうでなくても、そのタンクの共振振動数を計算により求めることができることになる。たとえば、新潟地震の際に出火した No. 1103 タンクについて、その半径=25.75m および油の深さ=13m という値を用いて、その共振振動数を計算により求めてみると、6.84 c/min となる。この数値は、新潟地震の際設置されていた建設省の強震計の記録より推定される比較的長い周期の振動波から求められる振動数と近似するため、複雑な実際の地震動と、この実験のような単純な一方の平面的震動との相違などの諸点を考慮するとき、地震動により共振に近い現象を生じたことは十分に考えられることである。

2.6.2 最大変位

共振時に生ずる最大変位は、図-5に示すように、液の深さにより変るばかりでなく、自由水面、自由油面および浮屋根の各場合についても変化する。一般的にいう

と、振幅が一定の場合、液の深さが小となるほど、また自由水面→自由油面→浮屋根の順に、最大変位も小となる傾向がみられる。これらの関係についても、前記の振動数の場合と同様に、理論的解析を行なうべく現在検討中である。

さらにこの最大変位に関しては、加賀氏が振動の減衰現象を利用して求める方法を発表している¹³⁾ので、今回の実験においても、その方法が適用できるかどうかを確かめるべく、減衰現象を測定して検討を加えてみた。その結果、浮屋根のある場合には比較的整った正弦波による減衰を示し、また自由水面で水深の大なる場合もそれに近い形が得られるが、その他の場合は波形が乱れるばかりでなく、振動前の液面に対し上下方向で変位や波形が異なるなどの現象が認められ、このような現象から減衰率を求めて利用することに疑点が生じたので、この方法の適用については今後さらに研究を進める必要があると考えられる。

しかし、図-5からも明らかなように、油が90%以上も入っている場合には、共振に近い現象を起せば、油の溢流を生ずることは疑問の余地のないところであり、し

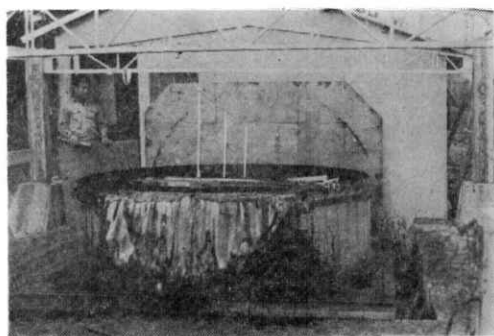


写真 原油の深さ 90% (65.3 cm) の場合における浮屋根の振動 (共振に近い状態) と原油の溢流している状況

Vibration of floating-roof (similar to resonance) in the case of the crude petroleum depth of 90% (65.3 cm) and the overflow of crude petroleum.

たがって、新潟地震の当時出火したタンクを目撃した多数の人々が「浮屋根の裏面が見え、多量の油が溢流した」と証言していることを実証するには十分であると考えられる。(写真参照)

2.7 おわりに

以上のように、今回の模型による振動実験の概要とその結果について検討を加え、最初に記した実験の目的について、できる限り明らかにするよう努力した。その結果は前記のように、ある点ではほぼその目的を達することができたが、実験の実施上、時間・施設・人員などの面で種々の制約もあって未だ十分に目的を達成したといえない点も多い。これらの点および今回の実験の結果新しく疑問を生じた点については、今後も研究を続行したいと考えている。最後に、研究費の援助を頂いた科学技術庁、国立防災科学技術センターの方々ならびに消防研究所の関係各位に深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 自治省・消防庁：新潟地震火災に関する研究 (p. 153 ~180)
- (2) Kaneo Senda & Kenji Nakagawa : Technology Report of Osaka University, 4, No. 117 (1954)
- (3) 加賀万亀男：地震時における原子炉容器内の水の振動。日立評論, 45, 4 (1963) (p. 95)