

# タンクのスロッシングおよび地震記象からみた 長周期地震動の特徴

## CHARACTERISTICS OF RELATIVELY LONG-PERIOD GROUND MOTIONS ESTIMATED FROM OIL-SLOSHING IN HUGE TANKS AND EARTHQUAKE RECORDS

山田善一\*・家村浩和\*\*・野田 茂\*\*\*・嶋田三朗\*\*\*\*

By Yoshikazu YAMADA, Hirokazu IEMURA, Shigeru NODA and Saburo SHIMADA

In this study, response spectra of long-period earthquake ground motion (approximately from 5 to 15 seconds) at several cities in northern part of Japan due to Nihonkai-chubu Earthquake 1983 are estimated from sloshing height of oil storage tanks and recorded data of acceleration and displacement type strong motion seismographs. Especially in Niigata city which is about 270 km away from the epicenter, very high sloshing is observed, from which equivalent velocity response spectrum is predicted to be more than 200 kine for 10 seconds structures with 0.1 % damping. Mended and corrected displacement and acceleration type strong motion seismograms are found to give much higher response spectra than design values for long period (5-10 seconds) structures with 2-5 % damping.

### 1. 序 論

本論文は、1983年日本海中部地震時における石油タンクのスロッシング現象や各種の地震記録から、やや長周期地震動の工学的特性を検討するものである。

最近における土木技術の進歩に伴って、大規模かつ固有周期の長い（数秒以上）構造物が次々と建設されている。長大吊橋、斜張橋、海上プラットフォーム、大型タンクなどは、その典型である。これら長周期構造物の設計スペクトルは、加速度記録の応答スペクトルを外挿することにより決定されてきたが、観測記録に基づいた実証的な値であるとはいいがたい。すなわち、長周期領域における加速度記録の信頼性が明確でないことや、気象庁1倍強震計は±3 cmで振り切れてしまうことが原因となっている。このようなことから、最近土木の分野においても、地震動の長周期成分に関する各種の工学的・理学的研究が観測および理論の両面から活発に進められ

ている<sup>1)~3)</sup>。

ところで、1964年の新潟地震では、石油タンクにスロッシングが発生し、長周期構造物の耐震安全性を考える契機になった。一方、1983年5月26日に発生した日本海中部地震（ $M=7.7$ ）は、各地の多数の大型石油タンクに大規模なスロッシングを起こした。特に、スロッシングの波高が多数測定された実例は、新潟地震にもみられなかったことである。地震時の液体の動揺すなわちスロッシングは大型タンクに限らず、各地のプールや河川などにおいても認められたようである。スロッシング周期は数秒～数10秒にわたる。したがって、やや長周期の地震動の大きさや性質を明らかにすることは、スロッシング高さを予測する上で不可欠であり、かつ急務であると考えられる。本研究の発想は、タンクに作用した地動をそのスロッシング高さより応答スペクトルの形で逆算できることに基づいており、その結果より、長周期地震動の特徴を示すことである。

上記のことを勘案し、本研究は、1)石油タンクのスロッシング高さから長周期地震動の応答スペクトルを逆算し、各種設計スペクトル値との比較・検討を行うこと、2)気象庁1倍（以下JMAとよぶ）とSMAC（ $B_1$ ）型の強震計記録から周期10秒前後の地震動の特性を明確にすること、3)JMAの飽和した記録をメンディングし、

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

\*\* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室  
(同上)

\*\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室  
(同上)

\*\*\*\* 正会員 前田建設工業(株)主任 土木設計部設計課  
(〒102 千代田区富士見2-10-26)

地震動の評価を試みるなどから、長周期地震動に対して、工学的な検討を加えるものである。

## 2. 日本海中部地震による地盤震動

日本海中部地震により、大型石油タンクが大きなスロッシングを起こした。秋田では火災が発生した。さらに、震央から約 270 km ほど隔たった新潟においては、震度がⅢで加速度計がほとんどトリガーしなかった（上下動成分によるトリガー・レベルは、5 gal (SMAC-B<sub>2</sub>) または 10 gal (SMAC-B) である）にもかかわらず、溢流を伴う大きなスロッシングが発生した。これらの事実は、地盤が長周期でかなり長い間震動したことを示している。

スロッシング現象が重視されるようになったのは、1964 年のアラスカ地震や、同年の新潟地震以降である。新潟地震では、大延焼火災を引き起こしたが、今回の地震によるスロッシングの規模は、新潟地震の際のものに匹敵するものであった。過去の石油タンク被害は、震源域に近い所に集中していた。このことを勘案すると、今回の地震のように、震央距離が 110~330 km の地点において、スロッシング現象が生じたことは注目に値する。

図-1 は、本震時に新潟地方気象台において観測された 1 倍強震計の自記紙である。

同図に示した新潟の 1 倍強震計記録の NS 成分をみると、約 2 分間ほどの振り切れの後、10 秒程度の周期の波が十数分以上にわたって継続している。このように、やや長周期成分が主要動のあとも「あとゆれ」の形で長く続いているのは、観測点近傍の大局的な地下深部構造の影響によると考えられる。すなわち、震源から射出された長周期成分の直達波だけでなく、軟弱地盤の盆地構造（不整形地盤）に起因する波の反射・屈折、言い換えれば不規則地盤の境界で二次的に発生する表面波の影響が強く現われたものであろう。いずれにしても、主要動の最初から周期 10 秒前後の波が卓越しており、スロッシングが顕著に認められたことと調和している。大きな

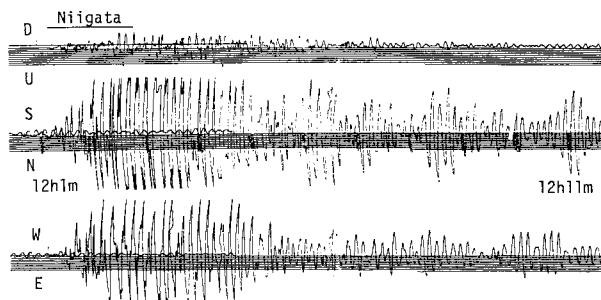


図-1 日本海中部地震（昭和 58 年 5 月 26 日）による新潟地方気象台での 1 倍強震計記録

スロッシングは、継続時間の長い長周期地震波との共振現象によるものと考えられる。

本地震による各地の最大変位を与えた周期と最大変位および震央距離との関係を、地震月報<sup>9)</sup>に示された各地の記録（主として 1 倍強震計）より検討したのが、図-2 と 3 である。ただし、振り切れた地方（秋田・青森・酒田・新潟）のデータは含まれていない。図中において、○が NS 成分、●が EW 成分の結果である。なお、1 倍強震計の固有周期は水平成分で 6 秒、上下成分で 5 秒である。

最大変位の生じた周期は観測点の位置によらず、ほぼ 5~15 秒に集中しており、平均的に 10 秒ほどの地動を励起したことを示している。最大変位が 1 cm 以上となった観測点では、ほぼ 10 秒の周期が卓越している。この結果は最大余震（6 月 21 日、 $M=7.1$ ）の場合もほぼ同じであった。ところで、ここでは図示していないが、十勝沖地震（1968 年 5 月 16 日、 $M=7.9$ ）、新潟地震（1964 年 6 月 16 日、 $M=7.5$ ）、青森県西方沖地震（1964 年 5 月 7 日、 $M=6.9$ ）では、震央距離が遠くなるほど、地震記録の最大変位を与えた周期が伸びていた。

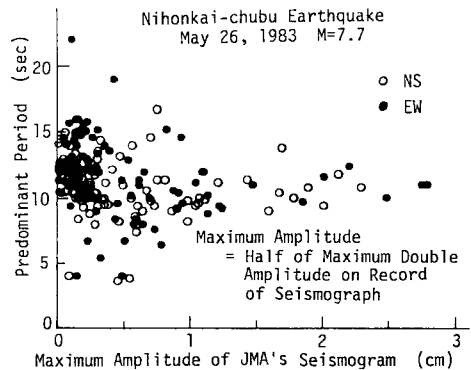


図-2 日本全国の強震計記録の最大変位と最大変位を与えた周期との関係

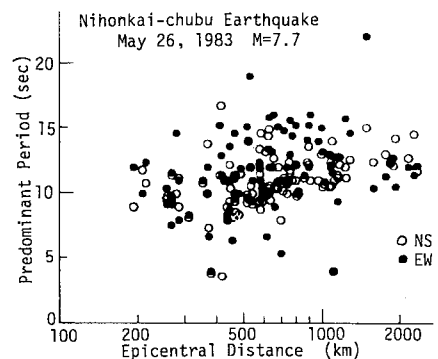


図-3 強震計の最大変位を与えた周期と震央距離との関係

このことより、本地震は、十勝沖地震・新潟地震や青森県西方沖地震時の挙動と異なった特性を有していることがわかる。参考のため、十勝沖地震の本震および最大余震 ( $M=7.5$ ) に注目し、全国の1倍強震計記録の卓越周期の頻度分布をとると、双峰性を示した。すなわち、周期が5, 15秒ほどの記録が多かった。このことも、本地震の結果と相違する特徴である。

本研究は、このような周期5~15秒ほどの地震動に注目し、石油タンクのスロッシング挙動と地震計の記録から、やや長周期成分の性質について、工学的検討を加えるものである。

### 3. 各地の大型石油タンクのスロッシング周期と液面変位との関係

著者らは、地震直後より、各地の大型石油タンクのスロッシング高さに興味をもち、東北・北陸および北海道における各都市の消防本部に、タンクの種類・直径・液深・内容液・地盤条件などに関する詳細なアンケート調査を実施した。すなわち、調査項目としては、タンクの種類とタイプ（浮屋根式、傘屋根式、ドーム屋根式などの別、円筒形・球形などの種別、地中式か地上式か、など）、タンクの底部の支持条件（底部固定の有無、基礎の種類）、タンクの種類、内容液の種類および液密度、タンクの直径（内形と外形）、タンクの高さ、地震時および満ばい時の液高さ、タンクの設置場所、設置点での地盤条件、スロッシング高さ、スロッシング高さの測定方法および推定による場合の計算方法、内面液の噴出状況の有無、液深の計測計の有無、被害状況とその箇所、などを考えた。

調査のうち、顕著なスロッシングが認められた、新潟・秋田・苫小牧・陸奥小川原・男鹿市における結果のみを示す。他の都市においては、大型タンクが存在しないかあるいは存在してもスロッシング挙動が非常に微小なものであった。各地域のスロッシング高さを、スロッシングの一次モードの周期  $T_s$  に対してプロットしたのが、図-4である。ただし、 $T_s$  は流体力学より、次式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$T_s = 2\pi \sqrt{D/3.682g \cdot \coth(3.682H_l/D)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $D$  はタンクの直径、 $H_l$  は液深、 $g$  は重力加速度である。

図-4より、新潟では、周期8.5~11秒のタンクにおけるスロッシングが他の周期帯のそれより異常に大きな値を示していることがわかる。スロッシング周期が10秒ほどで、最大の液面変位は4.5mにもなっている。秋田は震央より約110kmと震源に近いが、8~10秒のスロッシング高さは2~3.5mに達し、新潟よりもやや低い程度である。なお、4秒および15秒付近にもかな

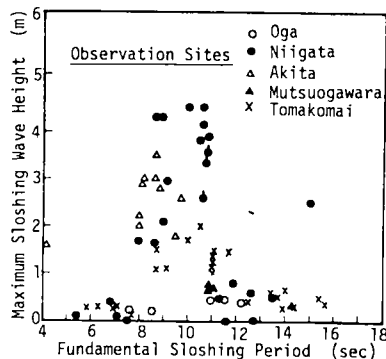


図-4 各地の大型石油タンクのスロッシング一次周期と液面変位との関係

り大きな値が存在する。震源から約330kmの距離にある苫小牧においても、約10秒ほどのスロッシング周期で、2mの波高のスロッシングが発生している。ちなみに、苫小牧の気象庁1倍強震計記録から計器補正して求めた最大地動はNS, EW, UD成分でおのおの、7.4, 13.6, 6.9cmであった。秋田よりもさらに震源に近い男鹿は、堅固な岩盤上にタンクが設置されており、非常に低いスロッシング高さであった。液面変位が70~80cmほどと小さい点では、陸奥小川原でも同じである。

スロッシングは、減衰の非常に小さい振動が原因で発生するから、地震波動のうち固有周期周辺の狭帯域の周波数成分にのみ敏感である。したがって、スロッシング周期に対応する長周期地震波が存在したことに間違いはない。図-1と図-4の結果を注意深くみると、1倍強震計記録はこうした事実をよく裏づけていることがわかる。スロッシング高さが地域や周期により大きく異なるが、その原因については震源過程や地盤条件などから現在検討中である。

### 4. スロッシング高さより逆算した応答スペクトル

スロッシングの一次モードのみを考えれば、その高さ  $\eta_{max}$  は、基準座標における1自由度振動系の最大応答変位そのものであり、速度ポテンシャル解を用いると、モード解析から次の関係を得る<sup>1)</sup>。

$$\eta_{max} = D/2g \cdot 0.837 S_A \\ = D/2g \cdot 0.837 (2\pi/T_s) \cdot S_V \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $S_A$ ,  $S_V$  は加速度および速度応答スペクトルである。

図-4の結果と上式より逆算した、 $S_V$ ,  $S_A$  を図-5, 6に示した。図-6の曲線群については後述する。なお、高次モードおよび地盤との相互作用が本結果にほとんど影響を及ぼしていないことを、解析的に確認している。このように、スロッシング高さやそれから逆算した応答

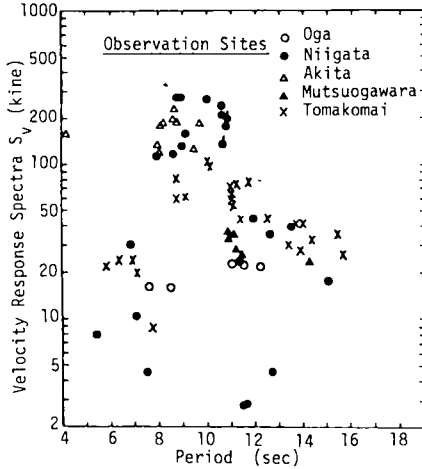


図-5 図-4のスロッシング高さから逆算した速度応答スペクトル

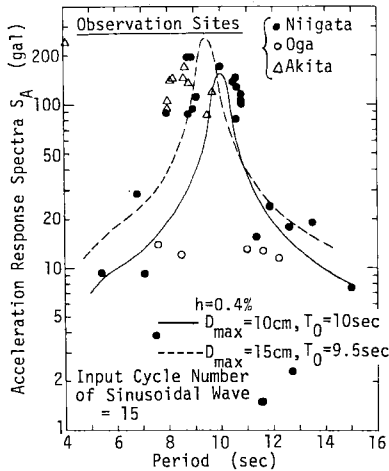


図-6 スロッシング高さから逆算した加速度応答スペクトルと正弦15波共振応答 (h=0.4%) との関係

スペクトルに関して、これだけの広範囲のデータを比較・検討した研究例はほかに見当たらない。

図-5からわかるように、新潟および秋田における  $S_v$  の逆算値は、周期9秒前後において200 kine以上の非常に大きい値を示しており、後述する自治省の告示値の2倍以上となるものもかなり存在する。新潟における大きな  $S_v$ ,  $S_a$  値を具体的に示すと、スロッシング周期が8.88, 8.74, 10, 10.58秒のおのおのにおいて、276.3, 272.1, 270.7, 247.6 kineと195.5, 195.5, 170, 147 galとなる。苫小牧では最大100 kine程度の速度応答を示している。一方、陸奥小川原や男鹿の  $S_v$  値は、いずれも新潟や秋田に比べてはるかに小さい値で、20~40 kineほどである。逆算値は減衰定数が1%以下の応答ス

ベクトルに対応するから、構造物の設計スペクトルとは直接比較できないが、異常に大きい値を示している。通常の構造物の減衰定数(2~10%)により、どの程度まで応答が低下するかは、8.で論述する。

一方、どのような正弦波が入力されれば、図-5と6中に記号で示した  $S_v$ ,  $S_a$  に相当する応答となるかを、数値計算により検討した。加速度応答について示したのが図-6の2つの曲線である。同図には、振幅10cm, 周期10秒, および振幅15cm, 周期9.5秒の正弦波15波に対する、減衰定数0.4%の1自由度系の最大応答値を示した。正弦波の振幅や周期は、後述する新潟の地動変位(図-10)と極端にかけ離れないように決めたものである。スロッシングから逆算した  $S_a$  値を説明するためには、加速度応答倍率が40倍などという異常な値となるが、入力振幅がもう少し大きかったかもしれない。いずれにしても、この程度の地動を考えない限り、スロッシング波高から逆算した加速度応答値を説明し得ないことも事実である。よくわからない地動を用いるよりも、共振する地動正弦波を3波与えるという、タンクの設計法がある。しかし、図から判断する限り、本結果は従来との考えられる。

- (1) Notification No.515 of the Ministry of International Trade and Industry (1981);  $B_1=1.0, B_2=0.6$
- (2) Notification No.119 of the Ministry of Home Affairs (1983);  $v_1=0.85$
- (3) Design Recommendation for Storage Tanks and Their Supports by AIJ (1984); Soil Condition Class 3,  $T_G=1.28$
- (4) Ibid.; Soil Condition Class 1,  $T_G=0.64$
- (5) Earthquake Resistant Regulation for Tall Buildings by AIJ (1973); Upper Limit of  $C_B$
- (6) Proposal for Revised Version of API Standard 650 Appendix P (1978);  $Z=1.0, I=1.5, S=1.5$
- (7) Aseismic Design Specification by Honshu-Shikoku Bridge Authority (1977);  $h=2\%$

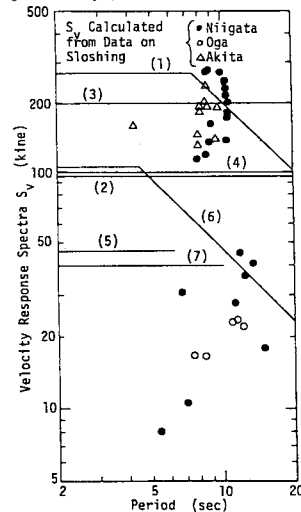


図-7 スロッシング高さから逆算した速度応答スペクトルと石油タンクのスロッシングに関する設計基準等の比較

図-7には、スロッシング高さ推定用のスペクトルおよび各種の長周期構造物の設計スペクトルと、本研究で逆算して求めた  $S_v$  値との比較を示した。

まず、石油タンクのスロッシング挙動に対する設計基準について、以下簡単に説明する。

通産省告示第515号<sup>5)</sup>は、昭和56年10月に、今までの震度法を基本とした高圧ガス取締法を改めて、修正震度法を基本とした高圧ガス設備等耐震設計基準として制定されたものである。この中には、スロッシングの影響を評価するために、新たにやや長周期の設計用地震力が考慮されている。しかし、この告示は、液化石油ガスなどのタンクの構造物各部の応力算定のための手法であり、スロッシングに関する規定ではない。第13条には平底円筒形貯槽の算定応力等の計算方法が定められている。これによると、第2設計地震動（タンクのスロッシングに対する耐震性を評価するもの）による応力が応答加速度  $9\alpha_2$  ( $\alpha_2$  は地表面における水平加速度である) に比例していることがわかる。係数の9は、タンク内部の液体の地動に対する加速度応答倍率を示すもので、いわゆる3波共振法の概念を背景としているようである<sup>11)</sup>。すなわち、正弦波地動を  $n$  波与えたときの減衰0.1%の応答倍率  $S(n)$  は、完全共振時に、 $S(n) = n\pi$  となる。したがって、3波共振によると、 $S(3) = 9.42$  となり、係数の9の意味がでてくる。

この告示の第3条および第13条より、速度応答スペクトル  $S_v$  を誘導すると、以下ようになる。

$$S_v = \begin{cases} 450\beta_1\beta_2 & ; T_s < 7.5 \\ 540\beta_1\beta_2 2\pi / T_s & ; T_s \geq 7.5 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$T_s$  は式(1)により求められ、 $\beta_1$  と  $\beta_2$  は、おのおの、重要度係数、地域係数である。新潟県、秋田県の  $\beta_2$  は0.6に決められており、 $\beta_1$  を1とすると、式(3)より計算した  $S_v$  は図-7の折線(1)のようになる。

原油などを取り扱う危険物は自治省管轄の規準による。自治省告示第119号<sup>6)</sup>には、地震波のやや長周期成分によって励起される、液のスロッシングの設計水平震度が定められている。その根幹には速度応答が100 kineを超過しないという判断がある。告示は、油の溢流が発生しないように、タンクの空間容積を規制している。それによると、空間高さ  $H_c$  を算定する式は以下のようにまとめられる。

$$H_c = 0.45D \cdot 0.15\mu_1 \cdot 4.5 / T_s \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\mu_1$  は地域別の補正係数である。

上式と式(2)を等値すると、速度応答スペクトル  $S_v$  は以下のように求められる。

$$S_v = 0.363 / \pi \cdot g \cdot \mu_1 \dots\dots\dots (5)$$

新潟、秋田県の  $\mu_1$  の値は0.85に規定されている。式(5)より、 $S_v$  を求めると96.2 kineとなる。

日本建築学会の容器構造設計指針案<sup>7)</sup>によると、スロッシング一次固有周期に対する設計速度応答スペクトル値は、次式により定められる。

$$S_v = \begin{cases} 156T_s ; T_s < T_c \\ 156T_c ; T_s \geq T_c \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $T_c$  は地盤種別による臨界周期である。第1種、第3種地盤の  $T_c$  の値は、おのおの、0.64、1.28である。図-7には、2つの地盤条件下での  $S_v$  の値、99.8 kine と199.7 kine をプロットしている。

なお、参考のため、アメリカ合衆国における設計スペクトル式<sup>8)</sup> (APIの規準650に付録Pとして提起されている考え方)によると、流動圧に関連した  $S_v$  は以下のようなになる。

$$S_v = T_s / 2\pi \cdot g z I C_2 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$C_2 = \begin{cases} 0.3S / T_s ; T_s < 4.5 \\ 1.35S^2 / T_s ; T_s \geq 4.5 \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $z$ 、 $I$ 、 $S$  は、おのおの、地震地域係数、用途係数、地盤別補正係数である。図-7には、 $z = 1.0$ 、 $I = 1.5$ 、 $S = 1.5$  の結果(図中の折線(6))を示している。

また、地震時の液体のスロッシングの解析とは異なるが、超高層ビルや長大吊橋の設計技術指針も比較のため検討した。日本建築学会の高層建築技術指針<sup>9)</sup>によると、弾性設計用のベースシャー係数  $C_B$  を用いて、速度応答スペクトルは以下のように換算できる。

$$S_v = T / 2\pi \cdot g C_B ; 1 \leq T \leq 6 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $T$  は構造物の固有周期である。ベースシャー係数として上限値  $C_B = 0.3 / T$  を採用すれば、 $S_v = 46.8$  kineとなる。

さらに、本州四国連絡橋公団で規定されている耐震設計規準(いわゆる本四スペクトル)<sup>10)</sup>の結果も、図-7に併記した。ただし、この規準は長大吊橋の上部構造を対象にしたもので、 $h = 2\%$ の結果である。したがって、実測のスロッシング高さから逆算した速度応答値と直接比較できるものではない。しかしながら、長大吊橋が新潟や秋田市に建設されていると想定した場合、日本海中部地震によってどの程度の応答を示すのかを知ることは工学的にきわめて重要であろう。

図-7からわかるように、周期10秒前後の逆算  $S_v$  値(特に新潟において)はこれまで説明した設計式のいずれの値よりも大きい。通産省告示と建築学会容器構造設計指針案(第3種地盤)を除けば、規制値よりもはるかに大きい応答を示している。通産省の取り扱うタンクの内容物は高圧ガスである。危険度を考え、タンクは密閉されている。したがって、液のスロッシングによる大き

注1) 千代田化工建設(株)の清水信行氏との私信による。

な応力がタンクの壁面に発生することを認容するならば、かなり大きな設計スペクトル値を与えていても不思議ではない。石油の溢流があってもそれによる被害の発生を極力回避するとするならば、経済的要因もあって、 $S_v$  値が低くなることも考えられる。しかし、今回の地震の例をみる限り、 $S_v=100$  kine 程度の規制値では必ずしも十分とはいえない。

スロッシングの出現状況は、地盤条件すなわちやや長周期帯域での地盤の揺れやすさによって異なる。たとえば、新潟は全国的にも長周期で揺れやすい地区として有名である<sup>11)</sup>。新潟における厚い堆積層により、かつ地盤構造の不規則さにより、長周期の地動は強い影響を受けたと考えられる。このようなことから、新潟ではやや長周期の地震動が卓越し、大規模なスロッシングが生じたのであろう。このことを考え合わせると、図-7 はスロッシングと地震動の関係を明らかにし、大型石油タンクの耐震安全性確立のための有益な資料を提起しているといっても大過ない。今回のスロッシングの事例から、現行の設計法の地域係数の設定がきわめて重要なことを示唆しており、この点を今後考えてみる必要がある。

## 5. 気象庁1倍強震計とSMAC加速度計の記録の比較

八戸港におけるSMAC ( $B_2$ ) 型強震計記録のうち、本震時の上下動成分の加速度波形を外力として、気象庁1倍強震計と同じ計器特性(固有周期 $T=5$ 秒、 $h=0.55$ )を有する振子の変位応答波形を求め、1倍強震計記録と比較したのが図-8である。SMACによる波形は、JMAの記録よりも、幾分、短周期成分が勝っているものの、周期10秒程度の波をよくとらえていることがわかる。比較的短周期側の波形の相違は、両計器の設置位置の違いによるものか、記録ペンの摩擦などによるものではないかと考えられる。SMAC型強震計の長周期地動に対する追従性の実験や地震計の信頼度を解析的に研究した例が、いくつか報告されている<sup>12),13)</sup>。しかし、この例で示すように、地震計の保守状態がよい場合、SMACとJMAの記録が類似するケースもある。

図-9は、2つの地震記録から求めた速度応答スペクトル( $h=2\%$ )を比較したものである。応答は、室蘭のNS成分と八戸のUD成分の記録から計算したものである。周期10秒でのSMAC ( $B_2$ ) 型の記録において、10~20%程度の誤差を指摘した実験結果も報告されている<sup>12)</sup>。しかし、同図より、八戸のSMAC記録による周期9.4秒の応答スペクトル値は約25 kineであり、この程度の地動でも現時点における工学的使用に耐えられるだけの精度をもって記録されていることがわかる。室蘭のJMAとSMACの地震記録による速度応答スペク

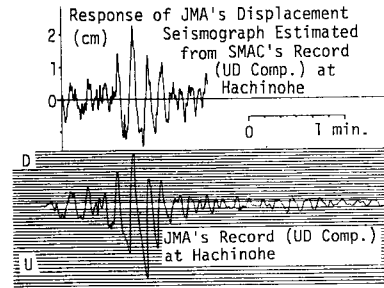


図-8 八戸における1倍強震計記録の上下動成分とSMAC加速度記録から求めた変位記録との比較

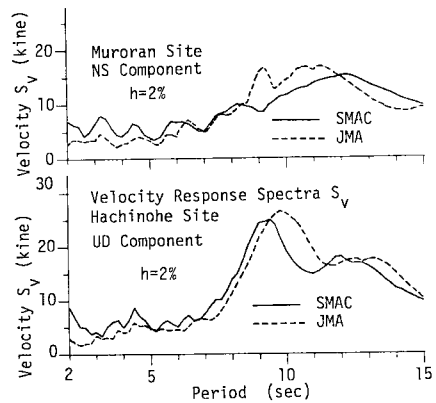


図-9 室蘭と八戸のSMAC記録および1倍強震計記録から求めた速度応答スペクトル( $h=2\%$ )

トルの比をとると、周期5秒以上で、周期によらず、ほぼ1に近い値を示していた。図-9の結果は、SMAC ( $B_2$ ) 型加速度計により、やや長周期の地震応答を近似的に推定できる可能性を示唆しているといえよう。

## 6. 新潟JMAの本震地動(NS成分)の再現

新潟市は本震のほぼ真南に位置しており、本震地動のNS成分(図-1)は主としてRayleigh波が寄与していると考えられる。スロッシングはこのような表面波により発生したといっても大過ないであろう。そこで、本研究では振り切れたNS成分の地震記録を補修してみることを試みた。NS成分に着目したのは、ほとんどすべてのタンクが南北方向(正確には $N 35^\circ W$ )で特に顕著なスロッシングが認められたことによる。

まず、振り切れた波を長周期成分波と考え、その直前および直後部の波形を用いて、アームの長さや記録ペンの速度を勘案し、メンディングを行った。記録の数値化は、デジタイザー(京都大学工学部土木工学教室計算機室の所有)によって行った。次に、中心軸の補正、記録ペンの傾斜に伴う $\theta_0$ 補正、円弧補正と計器補正を実施した。ただし、波形は、2秒以下と20秒以上の周期

をカットするため、Band-pass 特性を有する cosine 型の補正フィルターを通した。時間間隔は 0.1 秒としている。記録の処理システムの流れは文献 2) と同じである。

このようにして得られた地動の波形が、図-10 である。ただし、各種補正を行っても、図-11 に示すように、波の時間軸が反転する箇所が現われる。ここでは、このような現記録にみられる A-B-C-D の波を、3つのタイプ、1) A-B'-C-D、2) A-B-C'-D と 3) A-B''-C''-D のように、時間座標を強制的に移動することにより、波形を修正する方法を考えてみた。特に、本解析ではタイプ 3) の修正法を採用した。各種の補正後、地動の最大振幅は 17.9 cm, 10 kine, 15.8 gal となった。現段階では真の地動を精度よく推定できないが、周期 10 秒前後の波はほぼ上述の程度ではなかったかと推定される。

さらに、図-10 に求めた本震地動の NS 変位成分から計算した速度応答スペクトル ( $h=0.1\%$ ) を、図-12 に示す。図中には、本震時に作動した SMAC (B<sub>2</sub>) 型の加速度記録 (新潟東港) から得た、工藤の推定結果<sup>14)</sup> も併記している。10 秒程度以上の周期で、SMAC 記録による応答が JMA によるものより大きい。SMAC による記録の精度を勘案すれば、両者は大勢として調和しているといえる。JMA による応答は周期 10 秒前後で振幅がかなり大きくなっている。両者の細部までの一致はみられないが、ここで求めた再現波による速度応答値は、図-5 に示した逆算  $S_v$  値 (●印) の特徴をうまくとらえているといえる。この点については後述する。

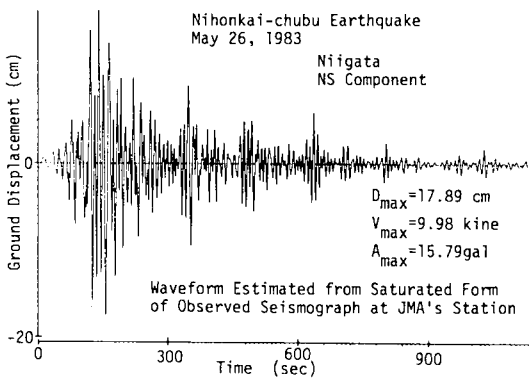


図-10 新潟での強震計の振り切れた NS 記録から推定した本震地動の変位波形

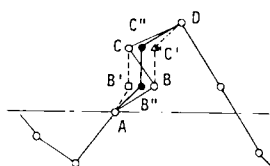


図-11 地震記録の時間軸が反転している波形の修正

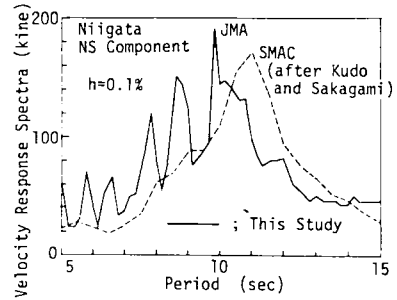


図-12 新潟の 1 倍強震計記録 (NS 成分) をメンディングして求めた速度応答スペクトル ( $h=0.1\%$ ) と SMAC 記録から得られた結果との比較

以上の結果は、本解析法の妥当性を示唆するものである。また、表面波としての特徴を有する、新潟での長周期の大変位をかなりうまく再現できることを、実証的に示したと考えられる。

### 7. スロッシング高さより逆算した応答スペクトルと強震記録による結果との比較

図-13 は、秋田市土崎港における本震時の SMAC 加速度波形である。なお、文献 15) に掲載されているこの記録波形の継続時間は 2 分である。しかし、減衰がきわめて小さい長周期構造物の地震応答を議論する際、継続時間の長い記録が必要になる。そこで、著者らは運輸省港湾技術研究所において、数値化可能なまでの地震データを採用することにした。それが図-13 の波形である。この記録には、断層の破壊過程および長周期成分に関連したとみられるマルチプル・ショックの様子がはっきりと現われている。

この SMAC 記録および新潟の 1 倍強震計記録の NS 成分を復元した波形 (図-10) から求めた速度応答スペクトルと、各地のタンクに生じたスロッシング高さより逆算した速度応答スペクトル値を比較したのが図-14 である。ただし、スロッシングの減衰性は非常に小さいので、 $h=0.1\%$  とした。

図-14 より、周期 8, 10 秒ほどにおける秋田のスロッシングから逆算したスペクトル値と SMAC による値

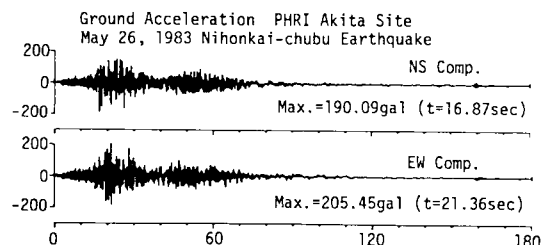


図-13 秋田市土崎港における本震時の SMAC 加速度波形

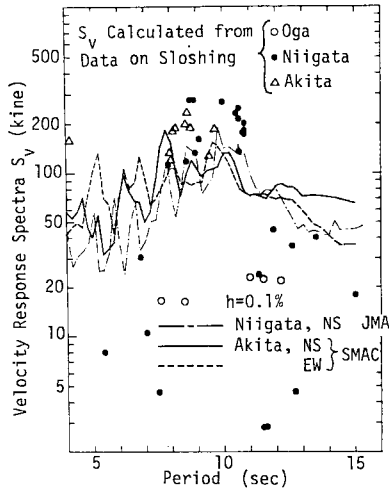


図-14 スロッシング高さから逆算した速度応答スペクトルと1倍強震計およびSMAC記録から求めた結果( $h=0.1\%$ )との比較

は、比較的よい対応を示している。しかし、9秒弱におけるスロッシングによるスペクトル値のピーク付近は、SMAC記録の水平2成分の合成波を考慮しても、とらえきれていない。この原因としては、タンクの設置位置とSMAC加速度計の設置位置の相違などが考えられるが、さらに検討が必要であろう。しかし、式(1)と(2)による応答スペクトル法による解析結果は、地震記録から求めたものと総じてよく一致しているといえる。

さらに、新潟のJMAから求めた速度応答スペクトルが秋田のSMAC記録による応答に匹敵しているのが、図-14の特徴といえる。SMACによる解析結果に誤差を見込んだとしても、170kmも離れた2つの観測点の応答が同程度となっていることは興味ある現象であろう。この結果は地震工学上重要なことを示唆しているが、ここでは割愛する。スロッシングから逆算した $S_v$ 値は地震記録から求めたものよりも大きくなっている。この点については現在非線形スロッシング波動などに関する詳細な解析を実施しているところなので、別途報告する予定である。いずれにしても、8~10秒の長周期領域において、スロッシングとSMACの両記録から、200kineにも及ぶ速度応答を示す地動が存在したことがうかがわれ、大変興味深いことである。

### 8. 長周期地震動の特性

秋田港、青森港、酒田港のSMAC記録(EW成分)および新潟のJMA記録より推定した再現波NS成分(図-10)による周期1~15秒における速度応答スペクトルを、図-15に示す。減衰定数は、長周期構造物の一般的な値として、 $h=2\%$ とした。なお、各港の

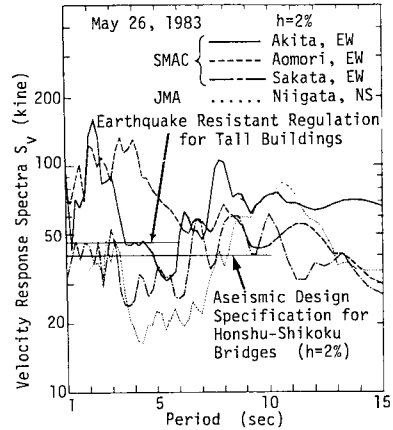


図-15 SMACおよびJMA記録から求めた速度応答スペクトル( $h=2\%$ )と長大構造物の設計技術指針との比較

SMACによる最大加速度は、おのおの、205 gal, 116 gal, 45 galであった。図中には、前述した高層建築技術指針および本四基準によるスペクトルも示した。秋田港でのスペクトルの周期2.2秒および7.8秒付近、青森港の2~4.5秒などに、これらの指針・基準をはるかに上回る100kine以上の速度応答が認められる。また、酒田港では地動最大加速度が45galに過ぎないのに、周期6~10秒の間のいくつかのピークで、60kineもの速度応答があることは注目に値する。このように、最大加速度が小さくても、地震記象に含まれるやや長周期成分が顕著に認められるとき、周期10秒前後の応答は大きくなる。図-15の結果は、秋田、青森や新潟にもし超高層ビルなどの長大構造物があったときにどのようなになっていたのであろう、という危惧をわれわれに教訓として残してくれた例であり、非常に有用な資料である。

図-16は、図-13の秋田の加速度2成分を用いて、速度応答スペクトルがピークを示すいくつかの周期につ

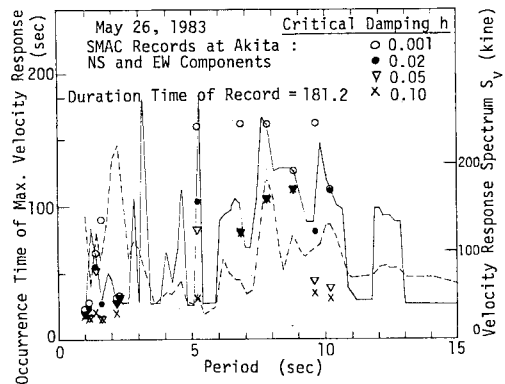


図-16 秋田のSMAC記録による最大速度応答の発生時刻に及ぼす減衰定数の影響



いて、その最大応答発生時刻を減衰定数別 ( $h=0.1, 2, 5, 10\%$ ) にプロットしたものである。この図の表示法を詳しく説明するため、図中には、 $h=0.1\%$  に対する EW 成分の速度応答スペクトル (破線) と、各周期においてその最大応答が発現する時刻 (実線) を示した。同様の図が NS 成分についても描ける。 $h=0.1\%$  のときに、両成分の速度応答スペクトル値が 100 kine を越えるいくつかの周期に対し、最大応答の発生時刻を示したのが図の○である。また、それと同じ周期で、 $h=2, 5, 10\%$  としたときの最大応答発生時刻を示したのが、おのおの●, ▽, ×である。

SMAC の記録は継続時間がたかだか 3 分間である。弱減衰になるほど、最大応答発生時刻は 2~3 分にもなる場合があり、さらに 3 分後において応答が最大になる可能性も秘めている。このことは、SMAC 加速度計の記録長の制限を考えれば、一般に SMAC 記録は減衰が小さいほど使えなくなることを示唆している。したがって、このような場合、気象庁 1 倍強震計の記録を用いた本解析の手続は威力を発揮するものと考えられる。

図-16 の結果によると、周期が約 3 秒以下の場合には最大応答発生時刻はほとんどの場合、減衰にさほど依存していない。しかし、周期が 5 秒以上の場合には、減衰が小さくなるにつれて、最大応答発生時刻が大幅に遅くなっていく。このことは、図-13 からみられるように、比較的短周期の領域では 1 分程度の主要動が支配的であるのに対し、周期 5 秒以上の長周期領域では、地震波の後部のコーダ部にも応答が左右され、特に減衰の小さい場合には、単に地動の振幅の大きさだけでなく、共振現象にかかわる継続時間にも大きな影響を与えるものと考えられる。

上記の特性を、1 倍強震計記録を用いて確認したのが

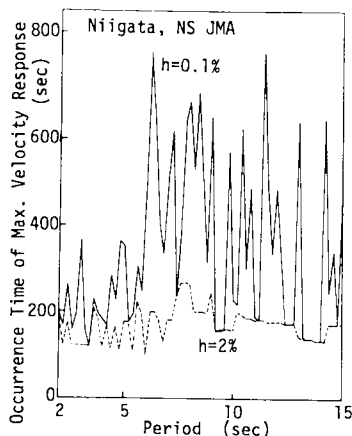


図-17 新潟のメンディングした JMA 記録による最大速度応答 ( $h=0.1, 2\%$ ) の発生時刻

図-17 である。図-16 と同じように、図-10 に示す新潟の地動を用いて最大速度応答の発生時刻をプロットしたものである。減衰は 0.1 と 2% を採用した。減衰が極端に小さくなると、地震動の開始時刻から 10 分も経過して、やっと速度応答が最大になる。したがって、長周期地震動を論ずる場合には十分な長さの記録が必要であろう。

## 9. 結 論

1983 年日本海中部地震により、各地で確認された石油タンクのスロッシングや溢流現象は、とりもなおさず、工学的には長周期の地震動がもたらした結果である。秋田・新潟において、スロッシング高さより推定した  $S_v$  は 100 kine を上回っており、5~15 秒のかなり長周期な成分が多量に含まれていたことが推察された。この事実は、SMAC や JMA の記録から定量的に解析した結果によっても裏付けられた。このようなことを勘案すると、長周期帯での地震動が増幅される地域、たとえば新潟において、自治省令の設定値は十分とはいえないことになる。長周期の地震動のみによって被害が生じた初のケースであるので、改めて設計スペクトルの設定に検討を加えてみる余地も残されているといえよう。

本研究で得られた結果をまとめれば、以下のようになる。

(1) 大型石油タンクのスロッシング現象やそれと関連の深い地震動のやや長周期成分の関係を検討するため、スロッシングに関する詳細なアンケート調査を実施した。その結果、震央距離が 270 km の新潟では 4.5 m の、330 km の地点の苫小牧では 2 m の、また 113 km の秋田においても、3.5 m の最大波高のスロッシングが発生していた。スロッシング周期は 8~11 秒の範囲に集中している。この結果は、気象庁 1 倍強震計記象の結果ともよく対応している。

(2) スロッシング高さから応答スペクトルを逆算したところ、スペクトル振幅は 200~300 kine, 100~200 gal の値になる。新潟と秋田の速度応答は 100 kine をはるかに上回るものであり、苫小牧でも 100 kine の応答を示す例があった。各地のスロッシング・データから逆算した  $S_v$  値や  $S_a$  値を統一的に比較・検討した研究はほかには見当たらない。

(3) スロッシングから逆算した加速度応答は、正弦波地動によるタンクのスロッシング応答倍率、いわゆる 3 波共振法による波数や振幅では十分に説明できない。逆算  $S_v$  値は、石油の溢流を発生させないように設定されている入力地震動レベル (自治省告示によると、新潟、秋田で 96 kine) よりもかなり大きい。周期 10 秒前後のやや長周期の地震動が励起されるような地域、たとえば

新潟においては、地域係数を含めてより詳細な設計基準値の設定を考えてみる必要がある。

(4) 石油タンクのスロッシング挙動は、気象庁1倍強震計記録(新潟の振り切れた水平NS成分をメンディングした波形)やSMAC加速度波形(秋田)からある程度説明できた。逆算  $S_v$  値は、やや長周期の地震動記録から求めた  $S_v$  と同程度かそれより上回るものである。

(5) 秋田や青森に超高層ビルが立地していたと仮定すると、構造物は非常に大きな応答を示し、少なからず被害の生じる可能性があったものと考えられる。これは、現行の弾性設計基準値(高層建築技術指針)の2倍の速度応答が数値解析により得られたことから実証されるものである。

(6) スロッシングは、長周期地震動の非減衰または弱減衰の速度応答スペクトル振幅と結びつけられる。震央距離が200~300kmの地点においても、大きなスロッシング波高が発生することがある。これらのことを考え合わせると、10分程度の長い継続時間の地震動記録が必要になる。現行の地震動観測の体制も、それに見合ったものにならなければならない。

謝 辞：本研究で用いたSMAC型強震記録は運輸省港湾技術研究所より提供して頂いたものである。各管区と地方気象台および測候所からは1倍強震計観測記録の提供を受けた。また、各地の消防本部からは石油タンクのスロッシング挙動に関する多くの情報提供を受けた。さらに、本研究における数値解析のプログラムの作成と数値計算に関しては、前田建設工業(株)土木設計部の吉田隆治氏に負うところが多い。1倍強震計記録の数値化に関する処理システムは、京都大学工学部の四方敏明技官の開発したものをを用いた。また、スロッシングの各種規定については千代田化工建設(株)の清水信行氏のご助力を頂いた。ここに記して関係各位の方々に深謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

1) (社)土木学会：屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討のため

- の入力地震波の変位特性に関する調査，昭和57年12月。
- 2) 建設省土木研究所・地震防災部・振動研究室：気象庁1倍強震計記録に基づく長周期地震動特性の解析—1968年十勝沖地震記録の解析—，土研資料第1869号，昭和58年3月。
  - 3) 山田善一・野田 茂：地盤特性および震源特性によるやや長周期地震動の感度解析，自然災害科学，Vol.3, No.2, pp.1~28, 1984。
  - 4) 気象庁：地震月報，昭和58年5月と6月，1984。
  - 5) 通商産業省：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の一部を改正する告示，高圧ガス設備等耐震設計基準，官報号外第93号，通商産業省告示第515号，pp.3~28, 昭和56年10月26日。
  - 6) 自治省：官報第16870号，自治省告示第119号，pp.10~12, 昭和58年4月28日。
  - 7) 日本建築学会：容器構造設計指針案・同解説，昭和59年10月。
  - 8) Wozniak, R. S. and Mitchell, W. W. : Basis of seismic design provisions for welded steel oil storage tanks, Presented at the Session on Advances in Storage Tank Design, Refining, API, 43rd Midyear Meeting, Toronto, Canada, CBT-5359, pp.1~34, May 1978.
  - 9) 日本建築学会：高層建築技術指針—増補改訂版—，昭和48年3月改定。
  - 10) 本州四国連絡橋公団：耐震設計基準・同解説，昭和52年3月。
  - 11) 岡田成幸・鏡味洋史：日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み，日本建築学会論文報告集，第267号，pp.29~38, 昭和53年5月。
  - 12) 栗林栄一・土岐憲三・若林 進：SMAC型強震計による地動の再現性について，第4回日本地震工学シンポジウム(1975)講演集，pp.153~160, 1975年。
  - 13) 川島一彦・高木義和・相沢 興：ディジタルによるSMAC型強震計記録の数値化精度，土木学会論文報告集，第323号，pp.67~75, 1982年7月。
  - 14) 工藤一嘉・坂上 実：1983年日本海中部地震による石油タンク被害と地震動の特徴について—新潟における石油溢流の問題点—，地震研究所集報，Vol.59, Part 2, pp.361~382, 1984。
  - 15) 運輸省港湾技術研究所：昭和58年(1983年)日本海中部地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料No.458, 1983年9月。

(1985.4.18・受付)