

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 { 工 藤 一 嘉
坂 上 実

(昭和 59 年 4 月 28 日受理)

要 旨

1983 年日本海中部地震の発生に伴ない、震央から 270 km も離れた新潟県下の大型石油タンクから石油が溢流した。地震により石油が溢流することは、石油コンビナートの耐震安全性を考える上で極めて重要な問題であり、溢流の原因となったスロッシングの発生状況、地震動の特徴について検討した。新潟における本震の地震観測記録類には、それぞれ欠陥があり、正確な地震動を把握できなかったが、以下のような特徴が見い出された。

1. 溢流の生じたタンクのスロッシング周期、8~11 秒における速度応答は少なくとも 100 cm/sec 以上で 200 cm/sec は超えない。
2. 最大地動変位は 10 cm から 20 cm の間である。
3. 長周期で大振幅の地動変位は、表面波としての特徴を有し、新潟における厚い堆積層による増幅を受けた結果である。

スロッシングに対する基本的理解は、新潟のデータを大勢としては説明するが、スロッシングが異常に大きい例もあり、基本的理解に検討を加える余地が残されている。溢流を発生させないために設定されている入力地震動レベル (速度応答=100 cm/sec) は、全国平均で見れば相当安全側に考慮されていると言える。しかし新潟の事例から、地域性を含めたより詳細な規準値の設定が要請される。

1. は じ め に

1983 年 5 月 26 日正午、男鹿半島西方沖に発生した日本海中部地震は、津波によって 101 名の人命を奪い、地盤の流動化・破壊をもたらし、特に港湾施設・道路・家屋・水田等に多大な被害を発生させた。

一方、中心的被災地の秋田県・青森県から遠く離れた新潟において、浮屋根式石油タンクから石油が溢流し、さらに一部浮屋根とその周辺部が破損するという、やや特異な被害が発生した。秋田では石油の溢流は認められなかったが、火災が発生しており、また各地で石油タンクの液面動揺 (スロッシング) が確認され、石油備蓄施設の耐震安全性に問題が提起された。

これまで、地震によって石油タンクに被害が発生した事例は関東地震 (1923 年) まで遡る (柴田, 1984) が、重視されるようになったのは、アラスカ地震 (1964 年)、新潟地震

(1964年)以降である。その後に発生した大地震の際にも石油タンク被害の事例があるが、いずれも震源域に近い所での被害であり、今回新潟のように震央から 300 km も離れた地点での石油溢流は初めての経験であろう。震源近傍ではタンク容器が短周期の地震動によって直接破損を受けたり、地盤の流動化により基礎が破壊し、またスロッシングにより石油が溢流する等、タンク被害の原因が複合している。しかし今回、新潟ではスロッシングに関連した被害に限られ、問題を単純化して考えることができる。

スロッシングの最大波高は 4.5 m に達したが、このようなスロッシング高さをもたらした地震動が、どのような特性を有していたかを議論する。始めにスロッシングと被害の概要を述べ、次にスロッシングと地震動特性との関連について検討する。

2. 被害の概要

新潟県内における石油貯蔵施設の地震被害は、新潟県総務部消防防災課により集約され、また地震直後に被害の様子が撮映されている。以降それらの資料に基づき被害の概要を述べる。

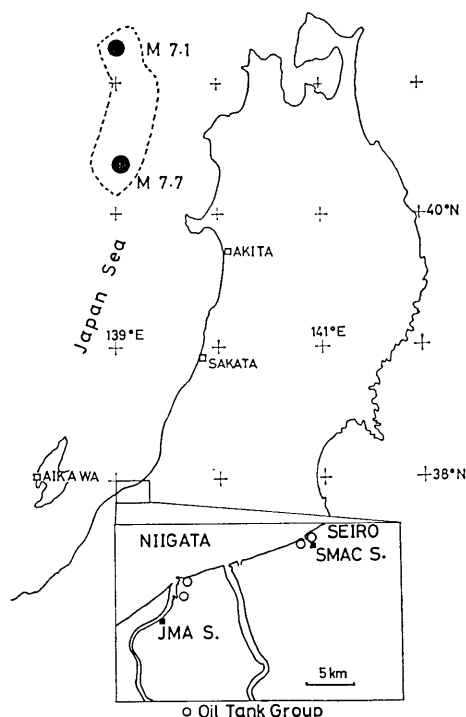


Fig. 1. The map showing the locations of the epicenters (solid circles), the observation sites (squares), and the oil-tank groups in Niigata prefecture (open circles).

新潟県には新潟市内とその東北東約 15 km に位置する聖籠町の 2 箇所に大型の石油貯蔵基地がある。Fig. 1 に気象庁発表による本震 ($M=7.7$) および最大余震 ($M=7.1$) の震央 (●印) および新潟県における石油貯蔵基地 (○印) 等を示す。両基地における震央距離および地盤条件等に大局的な差はないものとし、以降の議論では 2 つの基地の区別をしない。

新潟県内には約 200 基の特定屋外タンク貯蔵所 (危険物貯蔵量 1000 m^3 以上) があるが、日本海中部地震によって何らかの被害を受けたタンクは、全て浮屋根式で、許容貯蔵量が 30,000 m^3 クラス以上のタンクに限られる。溢流が発生したタンクはもとより、溢流を起こさなかったタンクでも、貯蔵されている油種が原油または重油の場合、内壁に油が付着し、スロッシングの痕跡を残している (Photo. 1)。新潟県ではいち早くスロッシングのデータが集約され、34 基 (内 3 基は内部開放中であった) の浮屋根式タンクの実態が把握されている。内部開放

Table 1. Data of oil tanks, sloshing heights and damage.

Tank No.	Height (m) × Diameter (m)	Capacity (m ³)	H _i (m)	T _s (sec)	Max. Height (m) / Direction	Amount of over-flowed oil (m ³)	other damage
1	23.7 × 78.46	100000	20.1	10.8	3.6 / North-South	2.7	weather protector guide pole same above
2	23.7 × 78.46	100000	20.3	10.8	3.4 / N-S	0.2	—
3	23.7 × 78.46	100000	0	—	—	—	—
4	23.7 × 78.46	100000	20.0	10.8	3.4 / N-S	0	none
5	22 × 78.46	95700	12.9	12.6	1.3 / N-S	0	none
6	22 × 78.46	95700	12.3	12.8	0.035 / N-S	0	none
7	22 × 78.46	95700	0	—	—	—	—
8	22 × 78.46	95700	8.6	15.0	1.2 / ?	0	none
9	22 × 78.46	95700	15.1	11.9	1.85 / ?	0	none
10	22 × 75.6	88800	19.3	10.6	2.7 / N-S	11.6	weather protector
11	22 × 76	90000	15.1	11.5	0.1 / N-S	0	none
12	22 × 76	90000	15.9	11.3	0.5 / N-S	0	none
13	22 × 76	90000	15.0	11.6	0.2 / N-S	0	none
14	22 × 76	90000	19.4	10.6	2.6 / N-S	117.4	weather protector hatch flange
15	22 × 71.7	80000	16.9	10.6	4.5 / N-S	0	none
16	22 × 64.6	65000	13.3	10.5	3.8 / N-S	0	none
17	22 × 62.1	60000	19.5	9.1	2.5 / N-S	9.7	pointoon, roof rolling ladder
18	23.7 × 78.6	100000	0	—	—	—	—
19	23.7 × 78.6	100000	20.0	10.8	3.9 / E-W	4.4	none
20	18.29 × 62	45000	13.9	10.0	4.5 / N-S	little	none
21	18.29 × 62	45000	6.6	13.5	0.5 / N-S	0	none
22	16.46 × 51.5	30000	5.1	12.7	0.1 / N-S	0	none
23	16.46 × 51.5	30000	12.6	8.9	4.3 / N-S	2.0	rolling ladder
24	16.46 × 51.5	30000	13.2	8.7	4.3 / N-S	59.3	weather protector
25	14.64 × 30.4	8000	5.6	7.5	0.1 / N-S	0	same above
26	15.28 × 52.33	29136	12.7	9.0	2.1 / N-S	0.1	pointoon, rolling ladder
27	15.23 × 44.58	21423	12.4	7.9	1.7 / N-S	0	none
28	15.23 × 44.58	20230	9.7	8.6	1.65 / N-S	0	none
29	19.8 × 32.94	15580	9.5	6.8	0.4 / N-S	0	none
30	18.3 × 25.19	8273	4.2	7.1	0.1 / N-S	0	none
31	18.3 × 25.19	8291	11.6	5.4	0.1 / N-S	0	none
32	18.2 × 48.4	30000	5.8	11.3	1.58 / N-S	0	none
33	18.2 × 48.4	30000	10.5	8.9	0.73 / N-S	0	none
34	18.2 × 48.4	30000	12.9	8.4	1.62 / N-S	0	none

中の3基を除いた31基中、10基から容器外に石油が溢流した。Table 1 に新潟県消防防災課に集約されたデータおよびスロッシングの1次固有周期(後述)を示す。溢流した原油または重油はタンクの外壁を汚し(Photo. 2, 3), 溢流量が多い場合には防油堤内に溜り(Photo. 4), その一部は防油堤外にも飛散した(Photo. 5)。溢流以外の被害としては、スロッシングによって浮屋根がタンクの外壁に衝突したために生じた事例が大半であるが、例えばゲージポール踊場の屈折(Photo. 6)、移動ばしごの脱輪・破損(Photo. 7)、浮容器(Pontoon 部)損傷による屋根への漏油(Photo. 8)、雨よけ板(weather protector)、融雪配管等の損傷が数多く発生している。なお被害総額は2~3億円程度と見積られている。

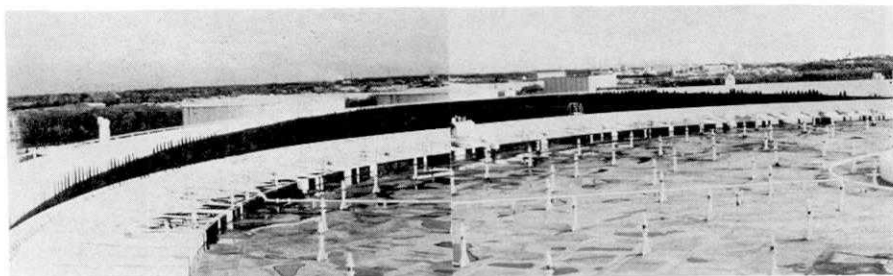


Photo. 1. Traces of sloshed oil (inside shell).

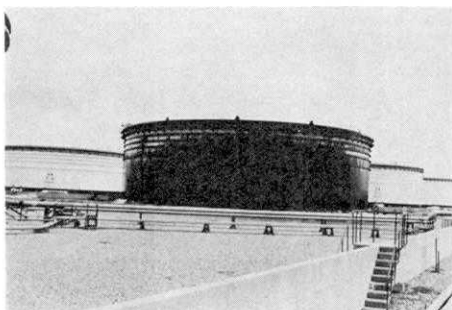


Photo. 2. View of the oil sloshed from the tank.

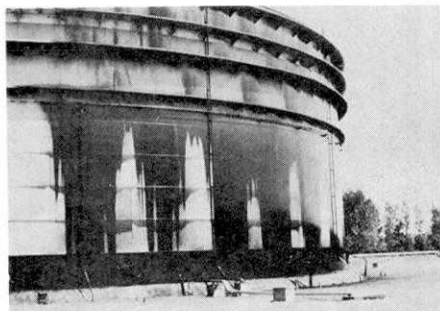


Photo. 3. The same as Photo. 2.

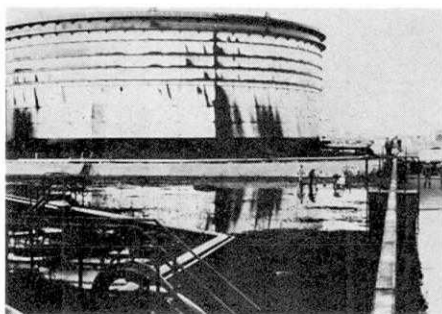


Photo. 4. Oil overflowed inside the oil fence.

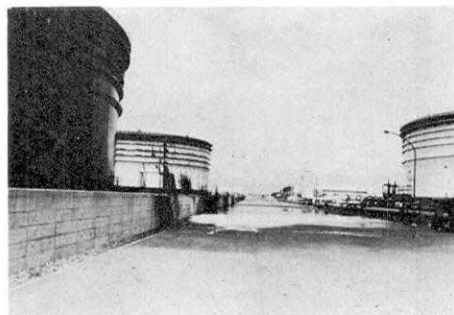


Photo. 5. Oil scattered outside the oil fence.

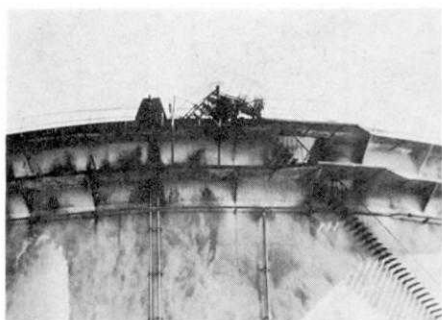


Photo. 6. Platform damage due to collision between roof and shell.



Photo. 7. Damage of rolling ladder on the roof.

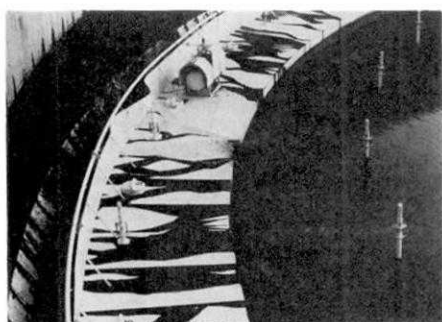


Photo. 8. Leakage of oil on the roof due to the collapse of pontoon.

(写真提供: 新潟県消防防災課)

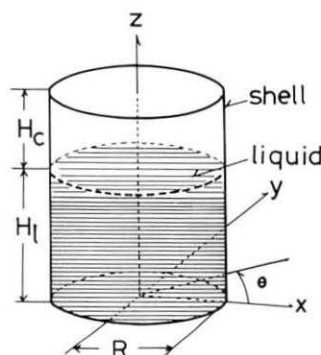


Fig. 2. Model of oil tank and geometry.

3. スロッシングに関する基本的理解と耐震規定

円筒型容器内の液体の動きは次のように理解されている(例えば, 曾我部・他, 1977; 山本, 1974; 土木学会, 1982)。液体は非圧縮完全流体で渦なしであること, 内容液面は自由であることおよび円筒タンクは剛容器(変形なし)で剛基礎に固定されている(ロッキングを起こさない)ことを仮定した時, 内容液の速度ポテンシャル Φ が次のように表わされる。なお概念図を Fig. 2 に示す。

$$\Phi = \left\{ R \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i J_1 \left(\varepsilon_i \cdot \frac{r}{R} \right) \cosh \left(\varepsilon_i \cdot \frac{z}{R} \right) \frac{dX_i}{dt} - r \frac{dx}{dt} \right\} \cos \theta \quad (1)$$

ここで

$$\beta_i = 2 / \{ \varepsilon_i^2 - 1 \} J_1(\varepsilon_i) \cosh(\varepsilon_i H_l / R)$$

J_1 : 1次のベッセル関数

ε_i : $dJ_1(y)/dy=0$ の i 番目の正根 ($\varepsilon_1=1.841$)

x : 地震動変位

X_i : 内容液の i 次の代表変位で次式を満たす,

$$d^2 X_i / dt^2 + 2h_i \omega_i dX_i / dt + \omega_i^2 X_i = dx^2 / dt^2 \quad (2)$$

h_i : i 次モードでの減衰定数

ω_i : 次式で表わされるスロッシングの i 次固有振動数,

$$\omega_i = \sqrt{g/R \cdot \epsilon_i \tanh(\epsilon_i \cdot H_l/R)}. \quad (3)$$

R : タンクの半径

g : 重力加速度

H_l : 内容液の高さ,

(1) 式の液体の速度ポテンシャルから, 液面上昇量 (η) は

$$\eta = \frac{1}{g} \left\{ R \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i J_1 \left(\epsilon_i \frac{r}{R} \right) \cosh \left(\epsilon_i \frac{H_l}{R} \right) \frac{d^2 X_i}{dt^2} - r \frac{dx^2}{dt^2} \right\} \cos \theta \quad (4)$$

と表わすことができる.

スロッシングの液面応答は 1 次モード (基本モード) が重要であり, 1 次モードのみを考えれば $\theta=0$ での壁面でのスロッシング高さは

$$\eta \approx \eta_1 = \frac{R}{g} 0.837 \left(\frac{d^2 X_1}{dt^2} + \frac{d^2 x}{dt^2} \right) \quad (5)$$

であり, 加速度応答スペクトル (S_A), 速度応答スペクトル (S_V), 変位応答スペクトル (S_D) を用いて, 最大波高 (η_{\max}) を見積ることができる.

$$\eta_{\max} \approx \frac{R}{g} 0.837 S_A \quad (6)$$

$$\approx \frac{R}{g} 0.837 \left(\frac{2\pi}{T_s} \right) S_V \quad (7)$$

$$\approx \frac{R}{g} 0.837 \left(\frac{2\pi}{T_s} \right)^2 S_D \quad (8)$$

但し $T_s = 2\pi/\omega_1$ (スロッシングの 1 次固有周期).

従って, 地震動により内容液が容器外に溢流しないためには, 然るべき空間高さ ($H_c = H - H_l$) を保てば良いことになるが, 地震動の強さをどのように評価するかに問題が帰着する. しかし, スロッシングの周期を含む周期帯における強震記録の解析例は極めて少なく, 現状では確定的な値を設定することが難しい. 限られた例の中で注目すべきは 1923 年関東地震の東京本郷での記録を解析した結果 (MORIOKA, 1980) で, 速度応答スペクトルが周期 10 数秒で 300 cm/sec ($h=0\%$) 近い値に達していることである.

一方, 1983 年 4 月 28 日に告示された自治省令 (官報, 16870 号) における空間高さ H_c は

$$\begin{aligned} H_c = H - H_l &= 0.45 \times (2R) \times 0.15 \times \nu_1 \times \frac{4.5}{T_s} \\ &= 0.6075 \cdot R / T_s \end{aligned} \quad (9)$$

に規制されている (但し ν_1 は地域係数で以降 1 を仮定する). (7) 式を書き直すと

$$\eta_{\max} \approx 0.537 \cdot (R/T_s) \cdot S_V \quad (7')$$

となり、(9) 式は $S_r \approx 110$ kine (cm/sec) 程度までの地震動入力に対し石油が溢流しないように規制していることを意味する。

スロッシングに関する基本的な考え方は同等であるが、 S_r あるいは S_D のかわりに、より単純に、長周期地動を正弦波と近似し、

$$\eta = x \left(\frac{2\pi}{T_s} \right)^2 \frac{R}{g} \cdot 0.837 S(n) \quad (10)$$

によりスロッシング高さを見積ることも提案されている(曾我部・他, 1977)。但し、 x は地動変位、 $S(n)$ は加速度応答倍率、 n は正弦波のくり返し回数である。経験的には $n=3 \sim 4$ が適当あり、 $S(3 \sim 4) \approx 10$ が指摘されている。

Table 1 をもとに、新潟におけるスロッシング高さと1次固有周期の関係を Fig. 3 に示す。図中、黒丸は溢流が生じたタンクを、白丸は溢流しなかったタンクを表わす。また△印は重油が、他は原油が貯蔵されていたことを示す。溢流した場合には正確なスロッシング高さを把握できないが、溢流量は多量ではないため、地震時のスロッシング高さと近似してさしつかえない。

最高値は 4.5 m に達しているが、例えば No. 15 タンクに対し (7) 式から逆算すると $S_r \approx 250$ kine もの地震動があったことになる。 $h \approx 0.1\%$ と仮定した場合 $S_r = 250$ kine という値は、関東地震の東京における地動の値に匹敵するものであり、はたして新潟にお

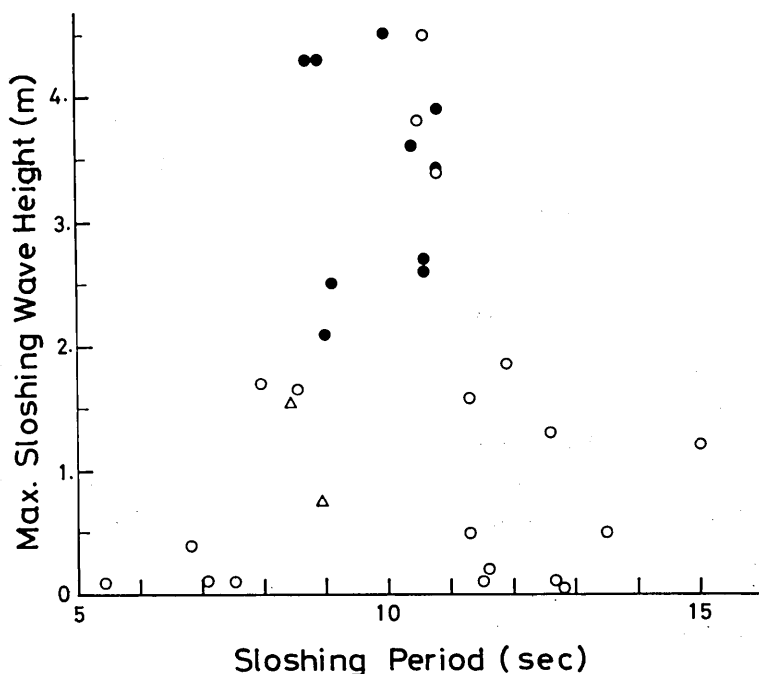


Fig. 3. Maximum sloshing wave heights vs. fundamental sloshing period. Open circles and triangles show crude and heavy oil stored in the tanks, respectively. Crude oil sloshed from the tank are shown by solid marks.

いて今回このような大きな地震動が生じたのであろうか。

4. 地震動の特徴

新潟市およびその周辺地域における強震観測は SMAC (Strong Motion Accelerograph Committe) 型加速度計と気象庁 1 倍変位計に限られる。SMAC 型強震計は10数台設置されているが、加速度が小さかったため、その多くは作動しなかった(上下動成分によるトリガーで、5 ガル (SMAC-B2) または 10 ガル (SMAC-B) 以上)。作動した数少ない例として、新潟東港(聖籠町)、新潟石油共同備蓄株式会社に設置されている SMAC-B 型による記録が入手された (Fig. 4)。最大加速度は水平成分が15ガル、上下動成分が4ガル程度であるから、計器の仕様上は作動しなくても良かった事になる。SMAC-B 型の記録紙上の感度は 1 mm/25ガルであり、記録された振幅は 1 mm 以下で極めて小さく、振幅の読み取り、解析には適さないのが通常である。一方、新潟地方気象台における記録は水平2成分共振り切れる (Fig. 5) という、極めて対症的な結果をもたらした。

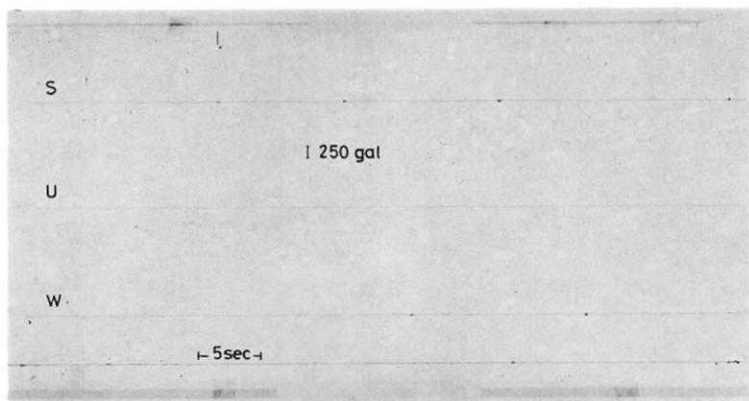


Fig. 4. Accelerograms observed at Seiro-cho in Niigata pref. by the SMAC-B type accelerometer.

今回、新潟で経験された地震動を正確に把握するためには、既存の強震計では不十分であることが指摘される。

しかし、ある程度の不確実性が存在するとしても、地震被害が発生している以上、地震動の性質を把握することが要請される。従って以下、SMAC 記録、1 倍強震計記録、臨時観測による最大余震の記録等を総合し、新潟における本震地動を評価する。

i) SMAC 記録とその解析

SMAC-B 型強震計は新潟東港石油貯蔵所 (37°59'13"N; 139°13'18"E) 内の一階建屋の床に設置されており、水平成分の方向は N35°W, N55°E で、奇しくも N35°W 成分は石油が溢流した方向と一致している。

通称 SMAC リーダー (SM 2 型、公称分解能 0.01 mm) を用い、時間間隔 0.05 秒 (記録紙上 0.5 mm) 毎に 141 秒間の振幅を読み取った。SMAC リーダーおよび密着コピーの制限から、約50秒毎に 3 部に分けて読み取った。

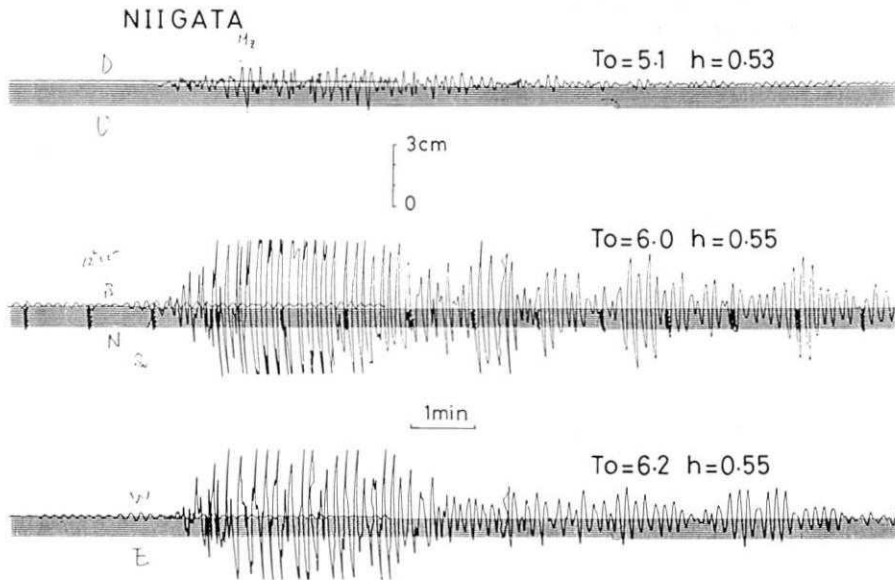


Fig. 5. Seismogram observed at Niigata JMA (Japan Meteorological Agency). T_0 and h show the natural period and the damping constant of the seismograph.

SMAC 型強震計記録の小振幅で、しかも長周期成分の解析には、記録の読取り誤差、分解能、記録紙の蛇行、記録紙—ペン間の摩擦による影響等が問題となる。この種の影響を全て取り除くことは困難で、通常ある振幅レベル以下はノイズとして処理される。SMAC 記録のノイズレベルがどの程度であるか、対象とし得る周期はどこまでかに関しては、計器の保守状況によって異なる事もあり、特定することができない。しかし、一般に SMAC 記録の解析で使用されるハイパスフィルターのカットオフ周期は 4~5 秒、ローloff周期は10秒程度であり、また、振幅の読み取り精度は総合的には 0.1 mm 程度であることが経験的に知られている。SMAC 型強震計の長周期地動に対する追従の実験が栗林・他 (1975) によって実施されているが、地動の振幅が大きい (30 cm) 場合には、加速度記録の積分によって得た変位が地動変位を良く再現する結果を得ている。但し、周期 10 秒以上の波では積分によって得た変位は、付加された地動変位に対し 10~20% 程度の誤差を有する。また直線を読取り、積分によって求めた変位は 20 秒程度の周期を有し、その振幅は 4~5 cm になっている。但し、実験は SMAC-B2 型 (感度=1 mm/12.5 ガル) で行なわれており、新潟における記録は SMAC-B 型であるため、上記の結果に対し、2 倍程度の誤差を見積る必要がある。

先に述べたように、3 部に分けて読取った約 50 秒間毎に直線回帰を行い、結合させた (Fig. 6 a)). 不必要な長周期成分の除去には漸化 チェビシェフフィルター (斉藤, 1978; 武尾・阿部, 1981) を用いた。但し、カットオフ周波数 (f_c) を 0.067 Hz, ローloff周波数 (f_R) を 0.04 Hz, $f > f_c$ でのパワーの振動幅を 0.1 dB, $f < f_R$ でのパワー振動幅を -50 dB とした。振幅特性は Fig. 7 に示される。このフィルターを通過させた加速度記

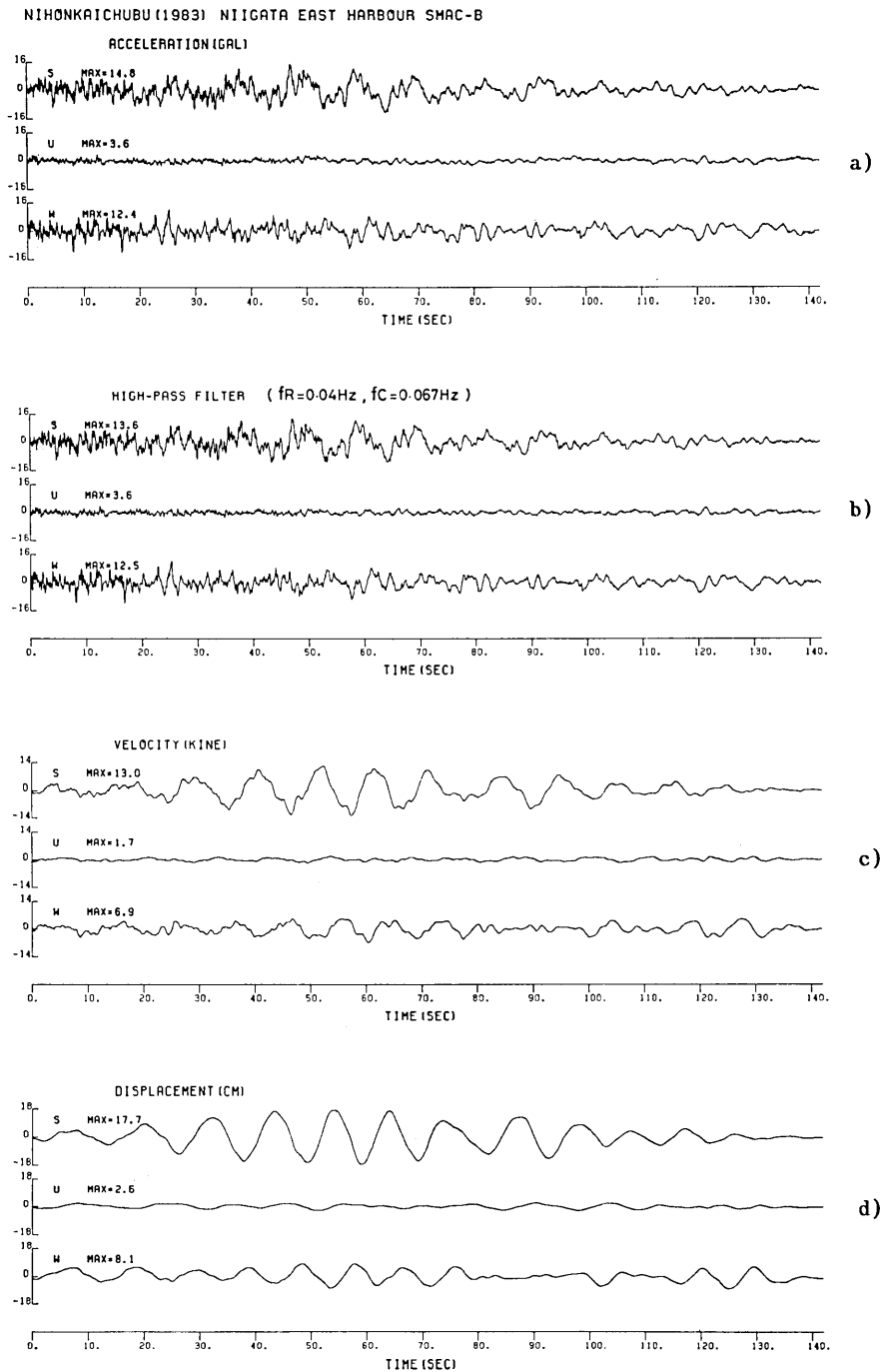


Fig. 6. a) Accelerogram (SMAC) on which base-line corrections were made. b) Ground acceleration after filtering the low frequency contents by the Chebyshev high-pass filter. c) Ground velocity. d) Ground displacement.

録を Fig. 6b) に示す。Fig. 6c), 6d) に示す速度および変位波形は、線形加速度法により求めた (例えば大崎, 1976)。

長周期成分の信頼性を検討するため、気象庁1倍強震計記録の上下動成分と、SMAC記録のハイパスフィルターによる処理後の

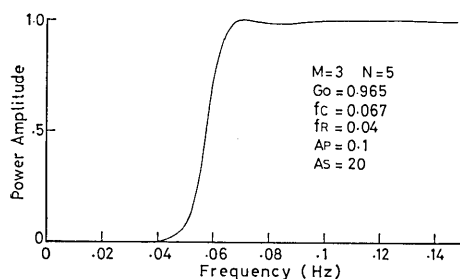


Fig. 7. Frequency characteristics of the Chebyshev filter used in the analysis. The notations M, N, Go, Ap and As are identical to Saito (1976).

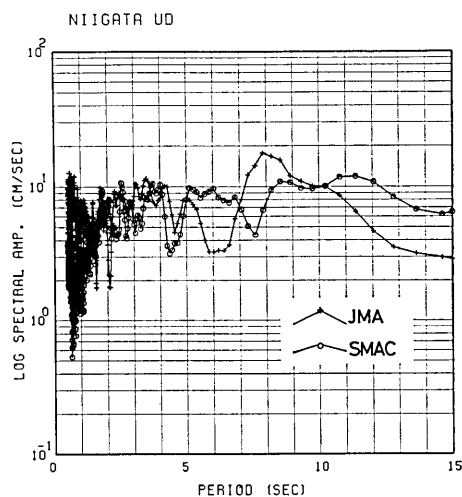


Fig. 8. Acceleration spectrum of vertical component observed by the SMAC-B accelerograph is compared with the observation at Niigata JMA.

上下動加速度 フーリエスペクトルを比較した (Fig. 8)。SMAC 記録の上下動成分は、3成分の中で最も小さく、厳密に言えば分解能以下の記録と言えるが、Fig. 8 に示すように、両者の差は大きい所で2倍程度に納まっている。両者の観測点位置は水平距離で15 km 離れており、全く同じ地震動を観測した訳ではないため、この比較が適切であるとは言いがたい面があるが、議論を長周期に限定しているため、2地点の地動がほぼ同一とみなす近似が許されよう。水平動成分の振幅は上下動より大きく、記録の精度は幾分良いことが期待される。

SMAC 加速度記録を用い気象庁1倍強震計の振子特性 (Fig. 5, 参照) を考慮した記象を求め、観測波形と共に Fig. 9 に示す。但し、SMAC 記録の絶対時刻が不明のため、時

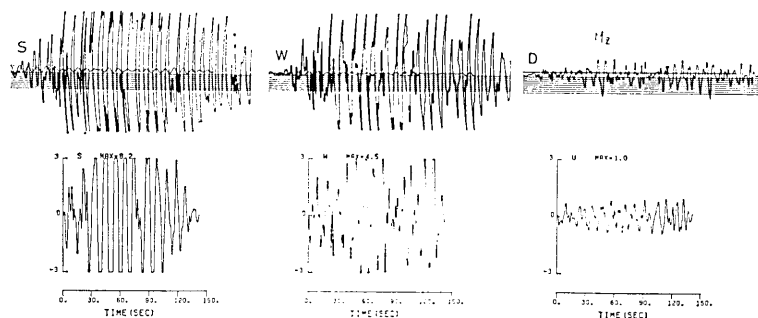


Fig. 9. Reproduced seismograms from the SMAC accelerograms, assuming the JAM type displacement-meters (lower traces) are compared with the seismogram at Niigata JMA (upper traces).

NIHONKAICHUBU AT NIIGATA E-HARBOUR

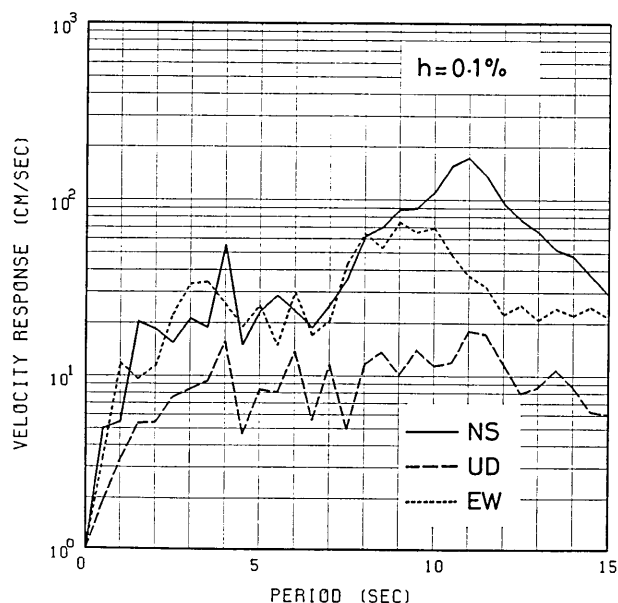


Fig. 10. Velocity response spectra ($h=0.1\%$) obtained through the SMAC records.

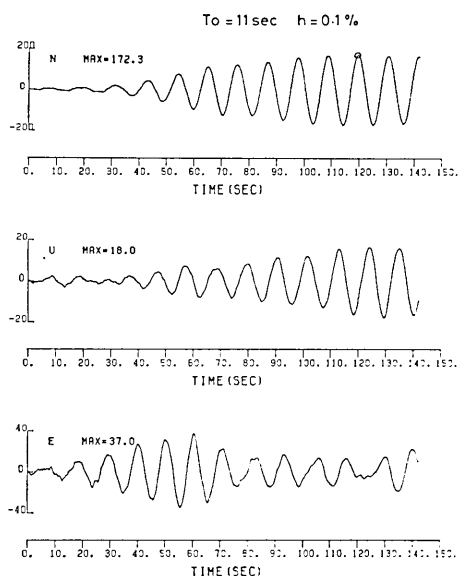


Fig. 11. Time history of the velocity response at period of 11 sec and damping of 0.1% .

間軸は任意である。SMAC 記録から求めた地震記象と、1 倍強震計記録は大勢としては調和していると言えるが、栗林・他 (1975) の結果を勘案し、SMAC 記録の周期 10 秒前後の値には 40% 程度の誤差があるものとして議論を進めるのが無難である。

ハイパスフィルターによる処理を行なった加速度記録から求めた速度応答スペクトル(減衰定数 (h)= 0.1%)を Fig. 10 に示す。最大応答は NS 成分の周期 11 秒で 170 kine に達している。また周期 11 秒における応答の時刻歴を Fig. 11 に示すが、NS 成分の最大応答 (○印) は記録開始後 120 秒後に現われている。SMAC 記録は 1 倍強震計に見られる coda 部分が記録されていないため、coda の卓越周期約 8 秒付近の応答値には修正が必要であらう。

ii) 余震記録とその解析

新潟気象台において加速度計による余震観測を実施した。動コイル型加速度計 ($h=19\sim 20$, 固有振動数 $=3.0\text{ Hz}$) およびデジタル記録器 (DACS I-AD1) を使用した。観測期間は6月8日から7月11日まで約1ヶ月間である。この間計6余震が観測されたが、本論では、その内、6月21日の最大余震 ($M=7.1$, 震央 $41^{\circ}15.7'N$: $139^{\circ}0.2'E$, 深さ 6 km ; 地震月報) の記録 (Fig. 12) を解析する。なお記録の最小分解能は 0.05 ガルである。また、記録器が起動して4分間記録した後、13秒後に再起動している。Fig. 12 に示す加速度波形は、それぞれ4分間毎にフーリエ変換法により地震計の特性を取り除き、空白時間の13秒間は振幅を0として連続させた結果を示す。

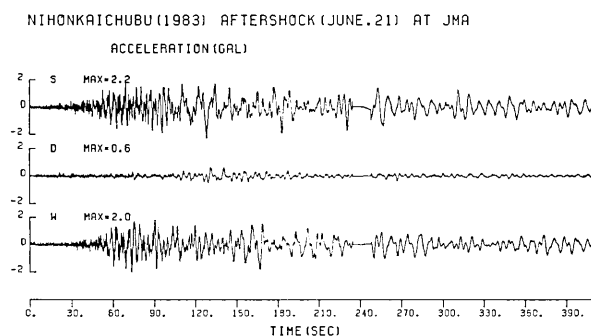


Fig. 12. Accelerograms of the June 21 aftershock ($M=7.1$) observed at Niigata JMA. The instrumental responses are removed and frequency components lower than 0.067 Hz are removed.

Fig. 12 に示す加速度記録をローパスフィルター (特性は 4. i) に同じ) にか、気象庁1倍強震計記録との比較を Fig. 13 に示す。空白13秒間を除き、両者はほぼ完全に一致しており、地震計の特性差による誤差は無視できることが分る。

また速度応答スペクトル ($h=0.1\%$) を Fig. 14 に示す。本震のスペクトルと比較すると、周期11秒付近で振幅が大きくなることを含め、全体として長周期側で振幅が大きい傾向は類似している。

Fig. 1 に示したように、新潟から見た場合余震は本震より約 100 km 北方に位置しているが、波の伝播経路は同等とみなすことが出来るため、本震・余震共に同種の波が観測されているという前提

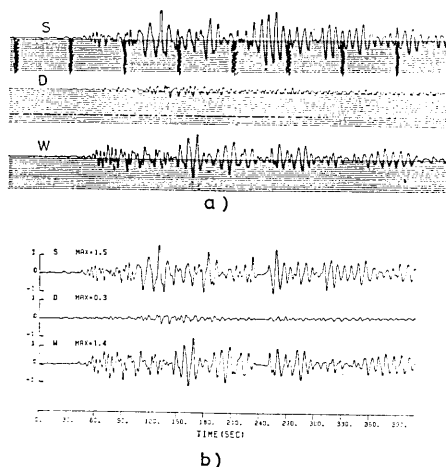


Fig. 13. The reproduced ground displacements from the digitally recorded accelerations of the June 21 aftershock are compared with the displacement record at JMA.

のもとに以下の解析を行なった。

iii) 表面波としての解釈

余震記録のランニングスペクトルを Fig. 15a) (NS・UD 成分), Fig. 15b) (EN 成分) に示す。両図から、群速度の分散が明らかに読取れる。群速度の分散は震源から観測点までの平均的地下構造を反映したものであるが、全体の地下構造は今の所明らかになっていない。しかし震源付近の P 波速度 (V_P) 構造は人

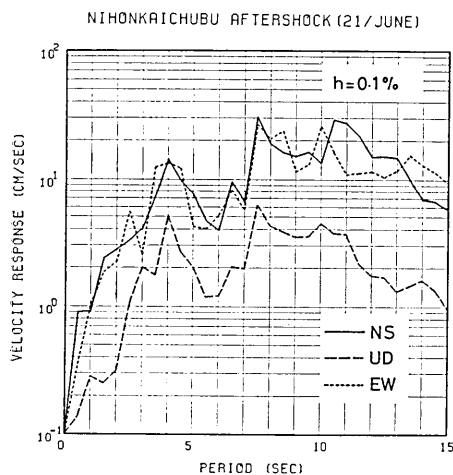
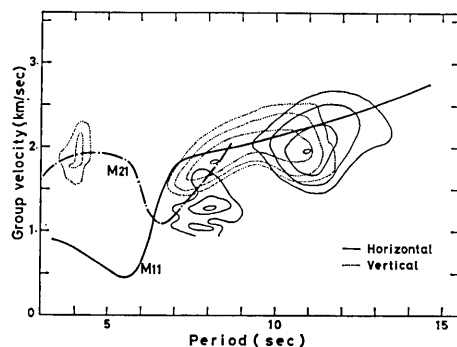
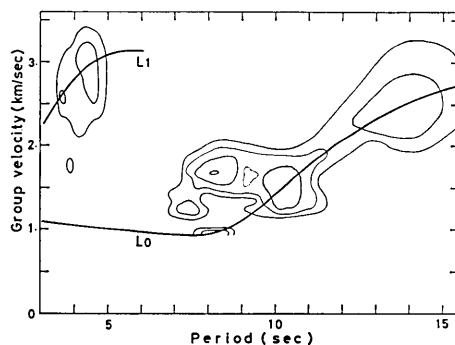


Fig. 14. Velocity response spectra ($h=0.1\%$) of ground motions from the largest aftershock (June, 21) at Niigata.



a)



b)

Fig. 15. Running spectra obtained through the accelerograms of the aftershock are compared with the group velocity dispersion curves of model JS1 (Table 2).

工地震による解析から求められており (YOSHII and ASANO, 1972), 日本海沿岸では地殻の厚さが 20 km 程度であること、表層に速度の小さい堆積層が 2-3 km の厚さで存在している事等が特徴としてあげられる。

群速度が分散することは、主要な波が表面波として伝播してきたことを示唆するものであり、また震源が浅かったことから表面波が卓越しても当然と言えよう。YOSHII and ASANO (1972) による地下断面図を参照し、Table 2 に示す平均的地下構造を仮定した。但し、 S 波速度 (V_S) は $V_P/V_S \sim 1.7$ を目安として与えたが、表層に関しては V_S を小さく与えた。また密度 (ρ) は YOSHII (1973) を参照して与えた。上記地下構造モデルに基づき、Rayleigh 波および Love 波の群速度分散を求め、Fig. 15 に観測値と共に示す。一部には不調和な部分も見られるが第 1 近似として、震源から新潟までの平均的地下構造としてモデル JS1 を採用することができる。

Table 2. Underground structure model JS1.

No. L	V_p (km/sec)	V_s (km/sec)	ρ (g/cm ³)	Thickness (km)
1	1.5	0.0	1.0	1.0
2	2.5	1.2	2.2	2.5
3	5.9	3.4	2.6	8.6
4	7.0	3.9	2.9	10.0
5	8.2	4.5	3.3	∞

iv) 深い地盤とのかかわり

相川と新潟は震央距離および方位の差が小さく (Fig. 1 参照), 観測点下の地下構造にも差が少なければ, 同じような波形が観測される筈である. しかしながら, Fig. 16 に相川での気象庁1倍強震計記録を示すが, 新潟の記録 (Fig. 5) とは大きく異なっている. 岡田・鏡味 (1978) は気象庁1倍強震計記録を用いて変位振幅の地域差を求めているが, それによれば相川での地動変位は全国平均の0.45, 新潟では2.95倍になり, 大きな地域差が指摘されている. 相川での最大変位は記録紙上12.5 mmであったから, 平均的な値としても, 新潟では記録紙上82 mm程度となり, 振り切られてしまうことはこの種の検討からも類推される.

地質的には, 相川では中新世の噴出岩が露頭し, 新潟市内あるいは新潟東港 (聖籠町) では中新世中期以降の堆積層厚が4000 m以上であることが知られている (例えば松田, 1980). 新潟での堆積層の主なものは, 鮮新世さらには第4紀の泥岩あるいは砂層であるが, 中新世後期, 鮮新世に堆積された泥岩あるいは砂岩のS波速度 (V_s) は0.4~1.5 km/s (嶋・他, 1968; 土木物探研究会, 1970) で, 中心的には0.7~0.8 km/sである. このようにS波速度の小さい地層が厚く存在する時には, 現在議論している周期帯での地震動に強い影響が現われ (例えばKUDO, 1980), 特別な考慮を必要とする.

表面波は速度の分散性以外にも実体波と異なる特徴を有するが, その一つには Rayleigh 波の水平動と上下動振幅の比があげられる. Rayleigh 波の水平動および上下動のスペクトルを U , W と表わすと, 複双力源による変位は

$$U = S(\omega) k^{1/2} e^{-i3\pi/4} \chi(\theta, d) \varepsilon_0 A_j e^{-ik_j r} / \sqrt{2\pi r}$$

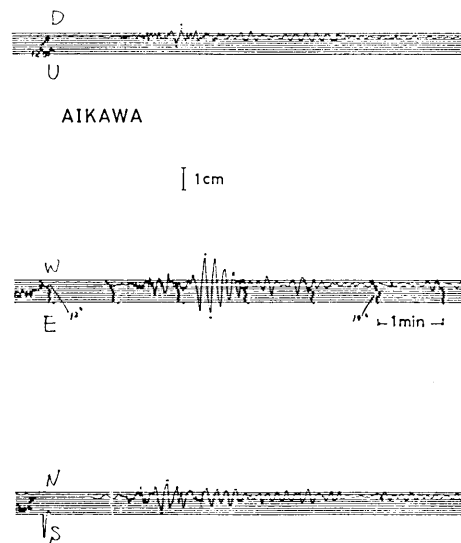


Fig. 16. Seismograms observed at Aikawa JMA. Both the epicentral distance and azimuth at Aikawa are almost identical to those at Niigata, but the ground motions are different each other (see Fig. 5).

$$W=U/(\varepsilon_0 e^{i\pi/2})$$

と書くことができ (HARKRIDER, 1970), 地表での水平動振幅/上下動振幅 (U_0/W_0) は震源の特性とは無関係に, 媒質の常数のみによって定まる ε_0 に帰着する. ここで,

$S(\omega)$ =震源時間関数

$\chi(\theta, d)$ =radiation pattern (θ : 方位, d : 深さ)

A_j =振幅特性 (j モード)

k_j =波数 (j モード)

r =震央距離

である.

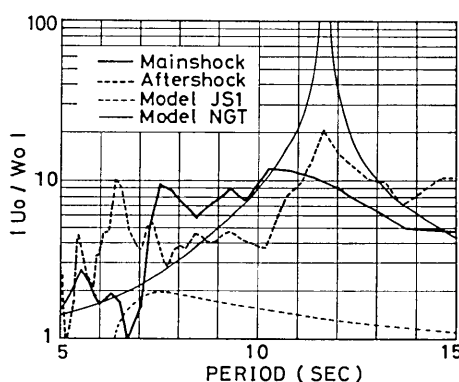


Fig. 17. Horizontal to vertical amplitude ratios of the observations and the Rayleigh waves for two structure models (Tables 1 & 2).

Fig. 17 は, 各観測値および地下構造モデルに基づく, $|U_0/W_0|$ を示す. 本震および余震の値は必ずしも一致していないが, 観測点が異なること, SMAC記録の分解能の限界があるため, 振幅比の特性が大勢として類似していることとして議論を進める. この2つの観測値は, 群速度の分散を説明できた地下構造モデル JS1 の振幅比と大きく隔たっている.

松田 (1980), 瀬尾 (1984) を参照にし, 新潟の地下構造として Table 3 に示すモデル NGT を想定し振幅比を求めると Fig. 17 の実線の如くとなり, 振幅比が非常に大きくなる傾向は一致する. いずれも M_{11} モードである. 地質学的デ

ータから堆積厚を適当に選んだが, 必ずしもこの値が適当であるかは検討の余地があるが, $|U_0/W_0|$ が大きな値を持つためには表層に速度の小さい層の存在が不可欠である. なお, 余震記録から求まった群速度の分散が, モデル JS1 による分散曲線とほぼ調和していたが, 厚い堆積層の存在する領域が, 震央距離に比べて十分小さいとすれば, 特に矛盾はない.

Table 3. Underground structure model NGT.

No. L	V_p (km/sec)	V_s (km/sec)	ρ (g/cm ³)	Thickness (km)
1	1.6	0.5	1.5	0.3
2	1.8	0.7	1.7	1.2
3	2.5	1.2	2.2	1.5
4	3.3	2.3	2.4	2.0
5	5.9	3.4	2.6	8.0
6	7.0	3.9	2.9	10.0
7	8.2	4.5	3.3	∞

v) Rayleigh 波としての本震地動

新潟地方気象台における本震地動（上下動および南北動）も主として Rayleigh 波が寄与していると考えれば、記録紙上で振り切れている南北動のスペクトル $M_H(\omega)$ は余震記録のスペクトル $A_V(\omega)$, $A_H(\omega)$ および本震で振り切れなかった上下動のスペクトル $M_V(\omega)$ を用い

$$M_H(\omega) = M_V(\omega) \cdot A_H(\omega) / A_V(\omega)$$

から求められ、またそのフーリエ逆変換により、波形が求められる。このようにして求めた本震、南北成分の加速度スペクトルおよび変位波形を Fig. 18 に示す。但し、スペクトル比を求める際に、群速度 3.0~1.0 km/sec に相当する Cos-Taper 型の time window をかけ、時間領域に逆変換する際には、本震の上下動成分と位相が $\pi/2$ だけずれるように与えた。Fig. 18 で得られた波形から 1 倍強震計の特性を考慮した波形を求め、観測値と比較した (Fig. 19)。細部までの一致は得られないが、合成波は観測波形の特徴を捉え

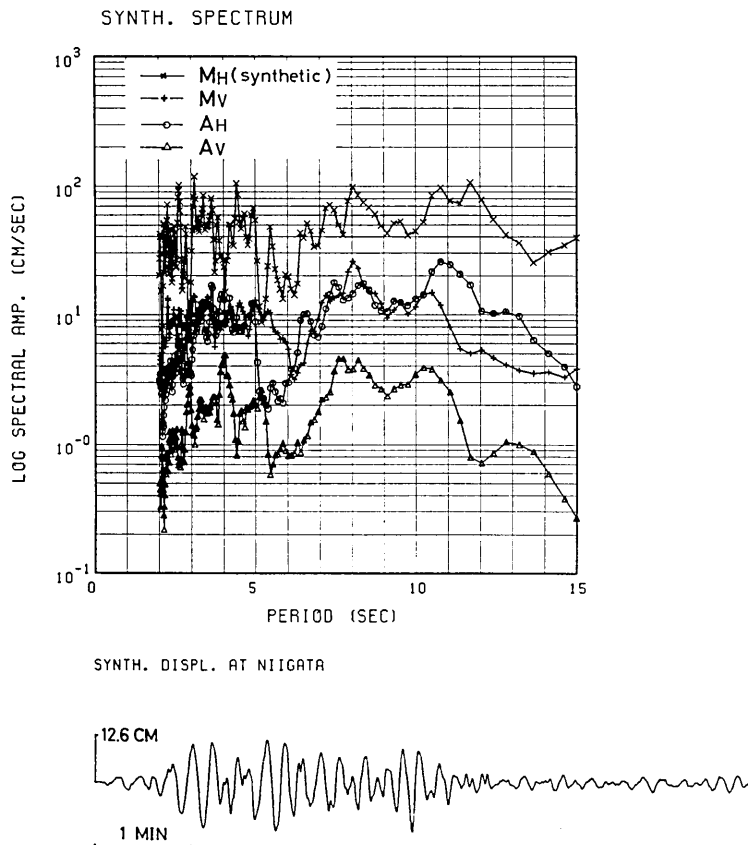


Fig. 18. Synthetic amplitude spectra (—*) and seismogram (N-S component) obtained by assuming the waves are mostly composed of Rayleigh waves.

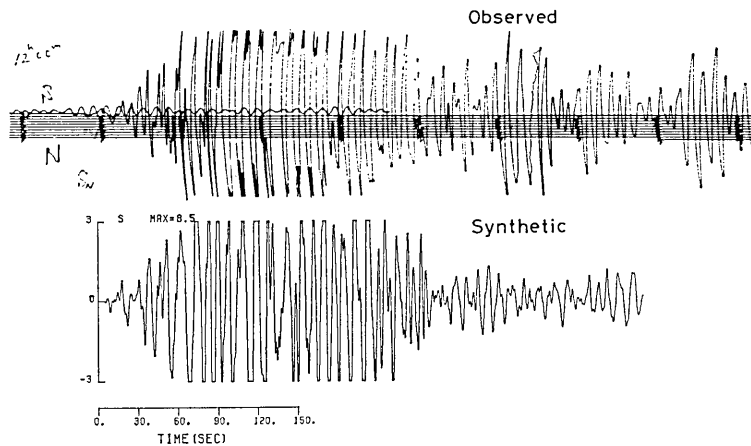


Fig. 19. Synthetic seismogram is compared with the observation at Niigata JMA.

ている。

SMAC 記録から得た変位波形 (Fig. 6) は Fig. 18 に示す波形に比べ振幅がやや小さくなっている。入倉・村松 (1984) による余震記録からの本震地動の合成結果は、Rayleigh 波として合成された Fig. 18 の結果に類似している。従って SMAC 記録による結果は、特に NS 成分をやや大きめに評価しているとも言える。しかし観測点が異なることもあり、断定はできない。

いずれにせよ、新潟での長周期の大変位は表面波としての特徴を有し、厚い堆積層による増幅作用の結果であることには疑問の余地はない。

5. スロッシングに関する耐震安全性の検討

前節で検討したように、日本海中部地震による新潟での地震動は、全ての強震計記録に不十分性があるため、特にスロッシングの周期帯では正確に把握されるに至っていない。しかし、SMAC 記録による結果に5割程度の幅をもたせて議論を試みれば、大勢を誤めることはないと考えられる。そこで、(7) 式に SMAC 記録 NS 成分から求めた速度応答スペクトルの値 (Fig. 9) を個々のタンクに適用し、スロッシング高さを求め、実際と比較した (Fig. 20)。SMAC 記録が正確であり、スロッシングの基本的理解 (7) 式に他の考慮が必要なければ、データは Fig. 20 の実線上に集中する。また SMAC 記録による見積りが正しくないとすれば、データの集中する傾斜が 45° ではなくなる。Fig. 20 には SMAC 記録に $\pm 50\%$ の幅をもたせた場合を破線で示してある。データの $2/3$ 弱は $\pm 50\%$ の範囲あるいは極く周辺にあり、スロッシングの基本的理解 (7) 式は、大局的には現実を把握していると言える。しかし残る $1/3$ のデータに関してはこの限りではない。さらに Fig. 20 にはスロッシングの固有周期を4段階に、さらに新潟市内 (■) と聖籠町 (○) の地域差を考慮して表示してある。それぞれの周期範囲内の地震動の差は小さく (2 倍以下) 同一マークのデータの分散は、スロッシング応答のばらつきと見るべきである。従って、スロッ

シングに関する基本的考え方（具体的には (6)～(8) 式）に対し、その導入に至る前提も含め、スロッシングを励起する他の要因について検討を加える必要があるう。

地震による石油溢流を防止するためにとられている貯蔵量の規制は、 $S_v \sim 100$ kine (cm/sec) を想定して設定されたものである。 $S_v \sim 100$ kine とする設定が妥当であるか否かは、経済的要因・他が複雑に交錯する問題であるが、仮に、地震により石油がタンクから溢流することを極力回避する立場で考えるならば、新潟での地震動の例から、設定値 $S_v \sim 100$ kine は必ずしも十分とは言えないことになる。1秒より長周期側の地震動を推定するため簡便な提案式は太田・鏡味 (1975)、工藤 (1978)、田中・他 (1978) 等がある。いずれの提案式も加速度フーリエスペクトルを与えるが、減衰がない場合の速度応答スペクトルと同等である

ことが知られているので、両者を区別しないことにすると、提案式の中で最も大きい値を示すものでも、震央距離 100 km 以上ではマグニチュード (M) が 8 を超えなければ $S_v \sim 100$ kine とはならない。いずれの提案式も東京の地下構造を想定または東京での観測値を用いているが、東京は全国的にも‘ゆれ易い’地区である (岡田・鏡味, 1978) ことを考慮に入れ、 $S_v \sim 100$ kine の設定値はかなり安全側に配慮されていると言えよう。

日本海中部地震の新潟における地動は、上記 3 提案式のいずれの値よりもはるかに大きかったが、例えば相川の振幅は、SMAC 記録および Rayleigh 波の合成記録の両者と比較して $1/7$ で、スペクトル振幅は $1/10$ を下回ると考えられる。地域が異なることにより、このような大きな差が生ずることは、自治省令には配慮されていない。周期 1 秒以上の地震動に対するきめの細い地域係数の設定も必要となる。

新潟ではスロッシングによる石油の溢流とそれに伴った施設の軽微な被害に留まったことは不幸中の幸いであり、新潟地震 (1964) の被害経験が生かされている事が伺われる (例えば雨よけ板が金属から皮革に変更; 新潟県消防防災課, 私信)。一方、秋田市では石油の溢流はなかったものの、タンクに火災が発生した。浮屋根と容器の金属間の摩擦熱が主原因と考えられ (秋田市消防本部, 新聞発表, 昭和59年1月14日付)、スロッシングの問題に帰着する。また被害はなかったものの、石油のスロッシングが各地で観測されており (瀬尾, 1984)、スロッシングと地震動との関係を明らかにし、耐震安全性確立のために十分な検討が必要であらう。

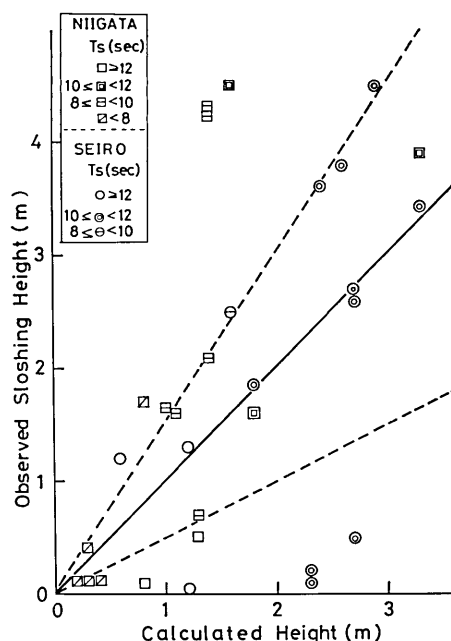


Fig. 20. Maximum sloshing wave heights observed vs. those computed by giving the velocity response shown in Fig. 10.

6. お わ り に

石油溢流の原因となった地震動を知るべく、種々の解析を行なったが、厳密な意味での把握はできず、5割程度の幅をもって考えざるを得ない。多様化している構造物と適合した強震観測の必要性が痛感される。新潟での石油溢流を通じ、改めて石油コンビナートの耐震安全性、スロッシングに関する理解、長周期の地震動把握等に関題が提起されたと言えよう。

新潟あるいは秋田での石油タンク被害は広域災害に至らなかったものの、その危険性がなかったとは言えない。大規模な石油コンビナートをかかえている東京湾岸で同じような地震動が生じた時に、同程度の被害で済むかという疑問には、現在、答えが用意されていない。

新潟での地動は誤差を見積ったとしても、最大変位は周期11秒前後で少なくとも10 cmを超えていた。このような地震動を正確に把握するには旧来のSMAC型強震計、1倍強震計では不十分であり、早急に観測体制の見直しが望まれる。

スロッシングに関する現時点での基本的理解は、おおむね現実を説明するが、誤差範囲を超えるデータも3割程度含まれ、再検討の余地が残されていると言えよう。

謝 辞

新潟県消防防災課から整理された貴重なデータ、被災直後の写真等の使用を快諾していただいた。新潟石油共同備蓄株式会社からSMAC記録およびスロッシング発生時の現場録音テープ等を提供していただいた。新潟地方気象台は加速度計による余震観測に便宜をはかっていただき、また1倍強震計記録の提供を受けた。気象庁地震課からは、全国各官署で得られた日本海中部地震・同余震記録のマイクロフィルムを借用した。ここに上記各機関に深甚の感謝の意を表します。

清水信行氏(千代化工建設 K.K.)、座間信作氏(自治省・消防研究所)には石油タンクに関する基礎資料を頂いた。厚く御礼申し上げます。

昭和59年2月、文部省科学研究費特別研究による自然災害科学総合研究班、地震動災害分科会において本論を発表した際、参加された諸先生から貴重な御意見を頂いた。瀬尾和大・入倉孝次郎・清水信行氏との議論は大変有益であった。嶋 悦三・大沢 胖・伯野元彦・柴田 碧・太田 裕各教授からは折にふれ、励ましと御教示を頂いた。山口林造博士からは貴重な御批判を頂いた。ここに深く感謝致します。

参 考 文 献

- 土木物探研究会, 1970, S 波速度について, 物理探鉱, 23, 179-182.
土木学会, 1982, 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報告書,
HARKRIDER, D.G., 1970, Surface waves in multilayered elastic media. Part II. Higher mode spectra and spectral ratios from point sources in plane layered earth models, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 60, 1937-1987.

- 入倉孝次郎・村松育栄, 1984, 日本海中部地震本震記録の再現, 地震学会春季大会.
- 工藤一嘉, 1978, 長周期構造物への地震入力に関連した表面波の評価, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, 273-280.
- KUDO, K., 1980, A study on the contribution of surface waves to strong ground motions, *Proc. 7th World Conf. on Earthq. Eng.*, 2, 499-506.
- 栗林栄一・土岐憲三・若林 進, 1975, SMAC 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講演集, 153-160.
- 松田時彦, 1980, 新生代後期の地層群 (日本の地質, 地球科学 15), 岩波書店, 158-162.
- MORIOKA, T., 1980, The ground motion of the great Kwanto earthquake of 1923, *Trans. of Archit. Inst. Japan*, 289, 79-91.
- 岡田成幸・鏡味洋史, 1978, 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, 267, 29-38.
- 大崎順彦, 1976, 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 193-203.
- 太田 裕・鏡味洋史, 1976, 耐震工学上考慮すべき地震波の周期の上限と振幅の下限, 日本建築学会論文報告集, 249, 53-60.
- 斉藤正徳, 1978, 漸化式デジタル・フィルターの自動設計, 物理探鉱, 31, 112-135.
- 瀬尾和大, 1984, 日本海中部地震における石油タンクのスロッシング現象について, 1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究報告書,
- 柴田 碧, 1984, 円筒液体貯槽の地震被害と耐震設計の今後の課題, 日本機械学会講演集,
- 嶋 悦三・太田 裕・柳沢馬住・工藤一嘉・河角 広, 1968, 東京都内におけるS波の測定結果 (第3報), 地震研究所彙報, 44, 417-429.
- 曾我部潔・重田達也・柴田 碧, 1977, 液体貯槽の耐震設計に関する基礎的研究, 生産技術研究所報告, 26, 261-290.
- 武尾 実・阿部勝征, 1981, 漸化フィルター法による加速度記録解析, 地震 2, 34, 351-364.
- 田中貞二・吉沢静代・大沢 胖, 1979, やや長周期帯における強震動の特性—長周期低倍率地震計記録の解析—, 地震研究所彙報, 54, 629-655.
- 山本鎮男, 1974, 貯槽類 (円筒) の耐震設計 (コンビナート保安・防災技術指針, 資料編), 高圧ガス保安協会, 249-260.
- YOSHII, T., 1972, Features of the upper mantle around Japan as inferred from gravity anomalies, *Jour. Phys. Earth*, 20, 23-34.
- YOSHII, T. and S. ASANO, 1972, Time-term analyses of explosion seismic data, *Jour. Phys. Earth*, 20, 27-58.

*Oil-Sloshing in the Huge Tanks at Niigata Due to the
Nihonkai-Chubu Earthquake of 1983*

Kazuyoshi KUDO and Minoru SAKAUE
Earthquake Research Institute

Oil sloshed from the huge oil tanks at Niigata due to the Nihonkai-Chubu earthquake of 1983, even though the epicenter was as far as 270 km away. The oil sloshed out generally for periods of 8 to 11 seconds.

The earthquake motions at Niigata were estimated by analyzing the displacement records and the accelerogram (SMAC) from the mainshock ($M=7.7$) and the accelerogram (digital recordings) from the June 21 aftershock ($M=7.1$). Because the horizontal components of displacement-meter were overloaded and the recorded amplitudes by the SMAC-B type accelerograph were too small to be analyzed exactly, the results obtained should have errors somewhat greater than we expected. However, it can be said with a certain degree of reliability that;

- 1) velocity responses of one mass system caused by the mainshock at Niigata in the periods from 8 to 11 sec. were over 100 cm/sec but less than 200 cm/sec,
- 2) the maximum ground displacement at Niigata was between 10 cm and 20 cm,
- 3) the long-period and large ground-displacements at Niigata were mostly composed of surface waves excited by the thick sedimentary layers at the site.

The limit value prescribed by the regulation for the safety of oil sloshing from the tanks is defined as a velocity response of 100 cm/sec. It can be said that the limit value of 100 cm/sec is reasonable as an average in Japan, but it should be increased for some sites due to local seismic-wave amplifications.

The data on sloshing obtained at Niigata roughly match the model for the sloshing of liquid in the cylindrical shell as it is generally understood, but the data that do not confirm to the model are included. So, clarification is needed on the scattering of the maximum sloshing wave heights as revealed in the data at Niigata.