

仮想南関東地震による震源近傍でのスロッシング波高の推定

ESTIMATION OF SLOSHING WAVE HEIGHT IN VICINITY OF SOURCE REGION
DURING THE HYPOTHETICAL SOUTH-KANTO EARTHQUAKE

岡本 隆* 山田 善一** 野田 茂***

By Takashi OKAMOTO, Yoshikazu YAMADA and Shigeru NODA

This paper presents some results from the response analysis of the sloshing wave of a tank in the vicinity of a source region using theoretical earthquake motion. The discrete wavenumber/finite element (DWFE) method proposed by Olson (1982) and the fault dislocation theory were applied to calculate theoretical earthquake motion. The wave height of sloshing is calculated by axisymmetric linear potential theory.

In the analysis, a hypothetical South-Kanto earthquake equivalent to the 1923 Kanto earthquake was assumed to have stricken the same place again. Five kinds of tanks with capacities ranging from 40,000kl to 100,000kl were considered for sloshing analysis. The analysis method was evaluated by comparing the calculated earthquake motion with observed data at Tokyo obtained during the 1923 Kanto earthquake. Maximum displacement and velocity of the calculated earthquake wave agreed well with those of the observed data. The maximum displacement at the point in Chiba prefecture near the source region is about 70 cm. Based on the response analysis of the sloshing, wave heights of 2.3m ~ 6.2m in Tokyo, and 3.4m ~ 9.4m at the point in Chiba prefecture were predicted.

1. まえがき

液体貯槽におけるスロッシング挙動の解明は、設計・保全上の重要課題の一つとなっている。1983年5月26日に発生した日本海中部地震(M=7.7)では、新潟市にある大型石油貯槽において大きなスロッシング波高が生じ、中には溢流した貯槽もあった。この地震を契機にして、大地震に含まれるやや長周期波成分により発生するスロッシング挙動の解明の重要性が再確認されるに至った。

大地震時における震源近傍でのスロッシング挙動を解明するには、震央距離が短い地点で得られたやや長周期波成分の地震記録を用いた検討が必要である。従来、加速度型の強震計による短周期地震波に関する研究は盛んに行われ、多数の実地震記録が蓄積されてきている。近年、建物の高層化、橋梁の長大化、貯槽の大型化に伴い、やや長周期地震波による構造物の挙動の解明が工学上の重要課題となり、この分野の研究が盛んに行われてきている。例えば、気象庁1倍強震計の記録を活用したり、断層震源モデルによってやや長周期波を評価する試みがなされている^{1)~6)}。しかし、大地震時における震源近傍でのやや長周期波成分の実地震記録の数は十分とは言えない。

* 工修 日本鋼管(株) 鉄鋼研究所構造研究部土木研究室 (〒210川崎市川崎区南渡田町1番1号)
 ** 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)
 *** 工修 京都大学助手 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

ところで、通産省の高圧ガス設備等耐震設計基準⁷⁾の運用に関する通達⁸⁾においては、時刻歴地震応答解析を行う場合の第2設計地震動(スロッシングに関する設計地震動)として、実地震記録の他に、「断層モデルによる人工地震波」を挙げている。この通達において、「断層モデルによる人工地震波」が第2設計地震動の一つとして挙げられている理由は、(a)震源近傍での実地震記録が不足しており、十分な検討が行えないことと、(b)「断層モデルによる理論地震記録」の作成に関する研究の結果、やや長周期の地震波を精度良く算定可能なことがわかってきたこと、によるものであると考えられる。

そこで、本研究では、この理論地震記録によるスロッシング応答解析の試みとして、1923年の関東大地震(M=7.9)が再び同一場所で発生するものと想定し、震源直上地点でのやや長周期(2.5~20秒)の地震動を推定し、大型貯槽のスロッシング挙動を求めるものである。

2. DWF E法による地震波の推定方法

本研究では、理論地震動を計算するに当たり、Olsonら⁹⁾が提案した離散型波数有限要素法(Discrete Wavenumber/Finite Element Method、略してDWF E法)を応用することにより、水平多層地盤におけるGreen関数を解析的に求めることを基礎としている。

この方法は、水平方向の変化はFourier-Bessel級数展開により離散化波数分解された波動方程式を、鉛直方向の変化は有限要素法を、時間に関しては差分法を適用して数値的に解く方法である。このDWF E法は、一定振動数以下の実体波(P波・S波)と表面波(Love波・Rayleigh波)を含む波動を同時に求めることができ、震源近傍での波形を計算するのに適している。また、波線理論による方法や波数積分法に比べて、計算時間をあまり要しないことが特長である。

図1は、DWF E法により波動場における解を求める概略を示している。相反定理により、観測点の地盤深さ z_0 に対応するグリッド・ポイント j_0 に力を作用させ、水平多層構造をなす媒質における波動方程式の解として、震源に対応するグリッド・ポイント j_s (深さ z_s)の応答であるGreen関数を求める。そして、水平方向には、Fourier-Bessel級数展開された波数に関して重ね合わせを行い、観測点(図中の円筒座標系で言うと、 (r, ϕ_s, z_0))での変位を求める。ただし、本手法では、Green関数を求める際、単位衝撃力のかわりに、図1中に示す単位ステップ関数的な外力を作用させている。

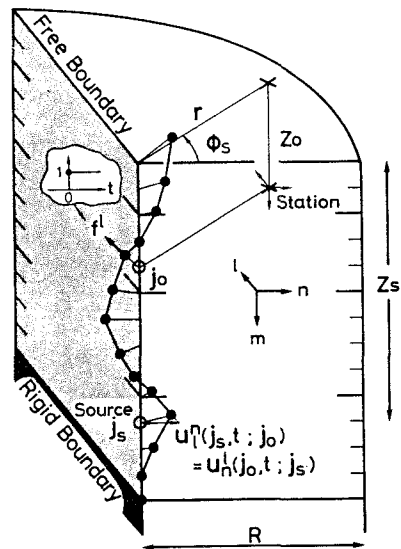


図1 DWF E法の概念図

なお、方法論の詳細とその有用性については、文献9)~11)などを参照されたい。

3. 想定南関東地震による地震動の推定

(1) 断層モデルと地盤構造

関東大地震の断層モデルは安藤¹²⁾、¹³⁾や金森¹⁴⁾らによって提案されているが、本研究では、松浦ら¹⁵⁾が測地学的データなどからinversion法によって求めた断層モデルを用いた。本研究で用いた断層パラメータ(断層面上の平均的な食い違い量 D_0 、傾斜角 δ 、すべり角 ϵ 、断層長 L 、断層幅 W 、断層上端の

深さ d 、走向 ϕ 、地震モーメント M_0 、破壊伝播速度 V_R 、ライズタイム τ の値を表1に、断層面の位置を図2に示した。また、震央は図2に+印で示した位置 (35.41° N, 139.22° E) にあり、震源深さは13.5 kmである。

地盤構造は嶋ら¹⁶⁾が夢の島付近で求めた爆破探査による結果をもとに作成した。ここでは、第一近似的に、この構造を震源域から観測点まで一様な平行層として仮定した。工藤¹⁷⁾が実施した地震動のシミュレーション結果によれば、横浜と東京を結ぶ測線上の地盤構造は、少なくともこのモデルで取り扱ってもよいことがわかっている。表2にその地盤構造の諸定数(各層の深さ、単位体積重量、S波速度、P波速度)を示す。

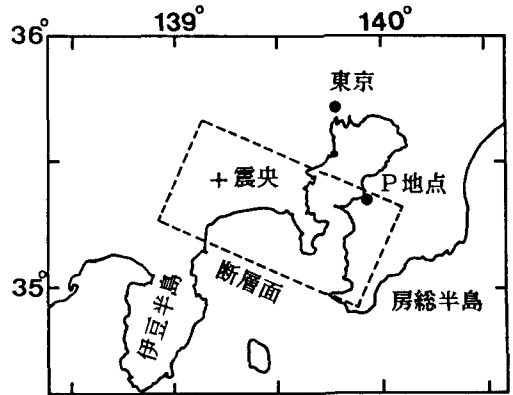


図2 断層面および観測点と震央の位置

表1 断層パラメーター

| | | |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------|
| Dislocation | D_0 | 4.8 m |
| Dip-Angle | δ | 25° NE |
| Slip-Angle | λ | 140° |
| Fault Width | W | 5.4 km |
| Fault Length | L | 9.5 km |
| Depth to upper fault margin | d | 1.9 km |
| Strike direction | ϕ | N66° W |
| Seismic Moment | M_0 | 8.4×10^{27} dyn-cm |
| Rupture Velocity | V_R | 2 km/sec |
| Rise Time | τ | 5 sec |

表2 地盤構造の諸定数

| 深さ (km) | 単位体積重量 (t/m^3) | S波速度 (m/sec) | P波速度 (m/sec) |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|
| 0 ~ 1.3 | 2.0 | 680 | 1800 |
| 1.3 ~ 2.3 | 2.3 | 1500 | 2700 |
| 2.3 ~ 6.0 | 2.7 | 3000 | 5500 |
| 6.0 ~ 以深 | 2.8 | 3400 | 6200 |

(2) 表面波の理論分散曲線

スロッシングの挙動を明らかにするには、やや長周期成分に大きな影響を与える表面波に関する検討が必要である。そのためには、本解析で用いた地盤構造に対する表面波の特性を調べておかなければならない。図3は、表2に示した地盤構造の定数を用いて計算した表面波の位相速度と群速度の理論分散曲線を3次モードまで示したものである¹⁸⁾。1次から3次モードの各々において、Love波については、8.2秒、2.2秒、1.2秒、Rayleigh波については、4.1秒、1.8秒、1.3秒において、群速度が一番小さな値でかつ極値を示している。これらの周期はこの地盤条件における表面波の卓越周期に対応している。

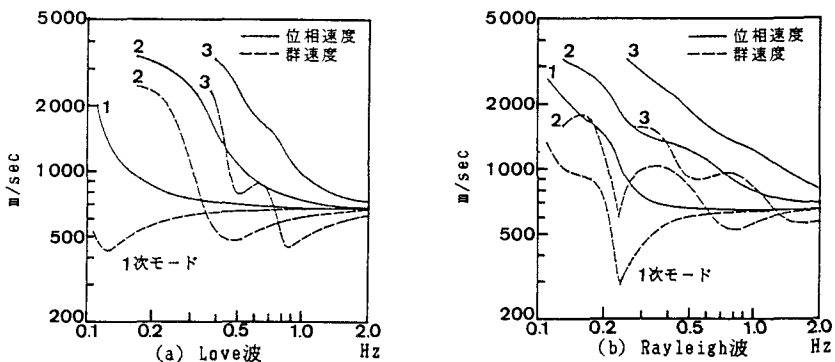


図3 理論分散曲線

(3) 断層の各要素のパラメーターとDWF E法

ここでは、図2の断層面を図4に示すように、長手方向に10等分、幅方向に5等分し、 11×6 個の点震源の集合体として仮定した。本研究では、図4の(4, 3)の点震源を破壊開始点とし、破壊フロントが一定速度 V_R で破壊開始点から同心円的な放射状に広がる移動震源モデルを考えて、地震波を推定した。この断層面の分割数は、断層面と観測点の間の距離、地震波の伝播速度や解析の対象とした周波数範囲から決まる分割条件¹⁹⁾、および計算時間や計算機容量などを勘案して決定した。

DWF E法により、各点震源でのGreen関数を計算する際、2.5~20秒の周期成分を考慮し、時間ステップは $\Delta t = 0.15$ 秒とした。また、地震波は約300秒まで計算した。Green関数は、各地層の媒質のP波・S波速度、各地層の細分割長や考慮すべき地震波の周波数帯域から決まる解の安定基準^{9), 20)}を満足するように計算している。

なお、後述するように、本解析で採用した解析法の精度に比べて、震源や地下構造に関する情報量は少ない。このことは現時点では、やむをえないことである。構造としてかなり粗い等価平行層近似を用い、震源としてHaskellモデル(巨視的モデル)を用いている以上、基本的には震源過程のプロセスタイム $[\text{Min}(L/10 \cdot V_R, \tau) = 4.75 \text{sec}]$ より短い周期成分を取り扱えない。こうしたことから、ここでは2.5秒より長い周期成分を計算しているが、本質的にシミュレーションで意味ある周期は約5秒以上と考えられる。

断層面上の各点震源での地震モーメントの分布は、深さ方向には図5に示すような三角形分布²⁾を、断層長手方向には一様分布を仮定して求めた。ライスタイム τ および破壊伝播速度 V_R は断層上の各点震源において同一とした。震源の食い違い速度関数としては図6に示すような関数 $A_0 \cdot f(t)$ ($A_0 = 3/2 \tau \cdot D_0$)を仮定した。

なお、得られた各要素波と合成波形には、20秒より長い周期成分を除去するために、等リップル漸化式チェビシェフ型フィルター²¹⁾による補正を行った。

数値計算に当たっては、京都大学大型計算機センターのFACOM M382システムを使用した。なお、Green関数の水平成分の計算時間は55分32秒、鉛直成分のそれは52分5秒であった。また、1観測点における3成分の波形計算には8分52秒を要した。

(4) 東京での地震動の推定

本方法の妥当性を検討するため、東京での地震動を推定し、1923年関東大地震時に東京・本郷でユース型地震計によって得られた実地震波との比較を行った。

図7に本研究で推定した東京での地震波(SW-NE成分)の変位・速度・加速度波を示す。また、図8は、ユース型地震計の振り切れた記録から森岡²²⁾により復現された実地震波(変位・速度・加速度波)である。本研究で推定した地震動(2.5~20秒)では、高い周波数成分を含んでおらず、一方、実地震波(0.2~15秒)には数値化などの処理段階での誤差に伴って高周波のノイズが目立っている。ユース型地震計は低倍率(1倍)で水平振子の固有周期は6秒であり、ダンパーは備えていない。気象庁1倍強震計の減衰定数は0.55であるが、固有周期や倍率はユース型地震計のものと同じである。気象

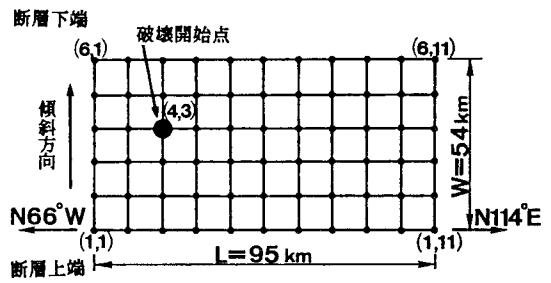


図4 断層面の分割

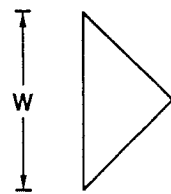


図5 深さ方向の地震モーメント分布

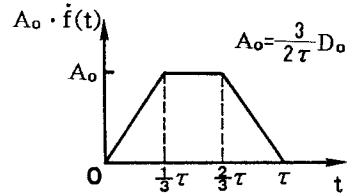


図6 震源の食い違い速度関数

片1倍強震計の特性からして、工学上使用可能な周期は数秒以上であることがわかっている^{1), 3)~6)}。このようなことを考えると、図8に見られるように、ごく高周波の成分の存在には疑問も残るところである。また、図8の変位波形を見ると、初動部がうまく捉えられていないようである。このようなことから、加速度においては両者の一致はみられない。しかしながら、速度と変位波の最大値においては良い一致を示している。

また、図9には、推定した地震動が最大変位を生じる方向 (N123°E) の、水平成分の波形と上下成分の波形を示した。水平成分の最大値は71.4gal、42.8kine、51.8cmであり、一方、上下成分では45.5gal、34.5kine、39.0cmである。地動の水平成分は、主要動のあとの coda 部において引き続き有意な加速度の値を示している。森岡も指摘しているように、このような地動の時間的推移状況は今村式地震計の記録や今村博士の体験談と対応している。

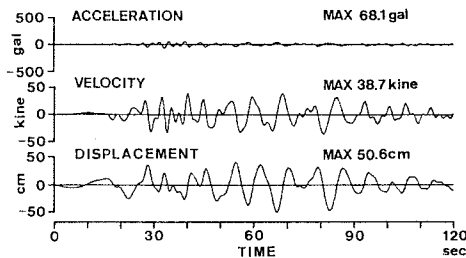


図7 東京での推定地震動 (SW-NE成分)

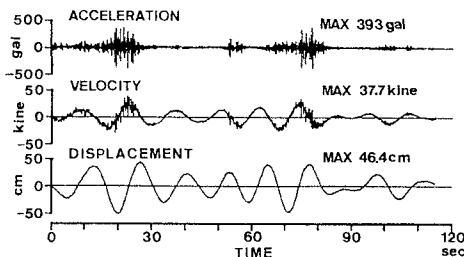
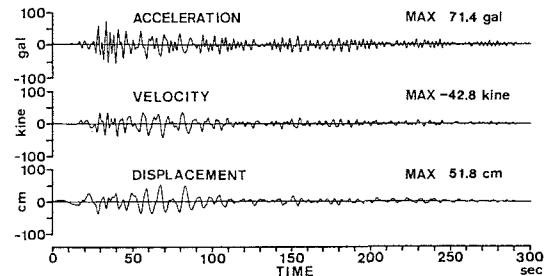
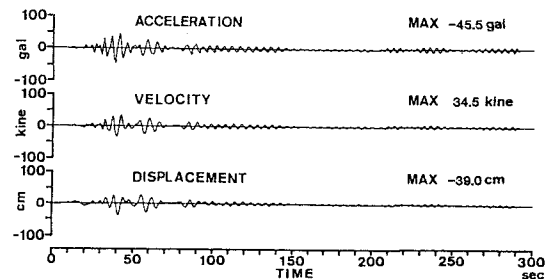


図8 東京での観測記録 (SW-NE成分)



(a) 最大水平変位の生じる方向 (N123°E) の成分



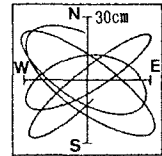
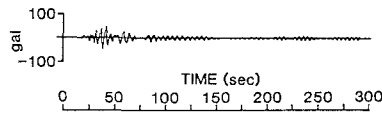
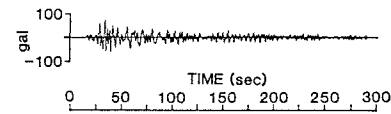
(b) 上下成分

図9 東京での推定地震動

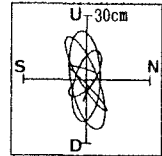
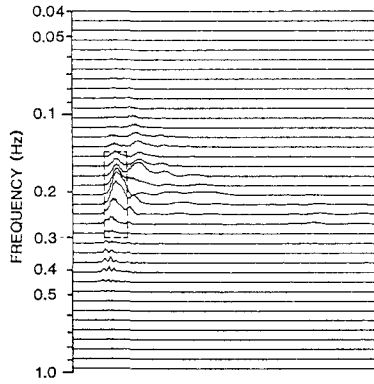
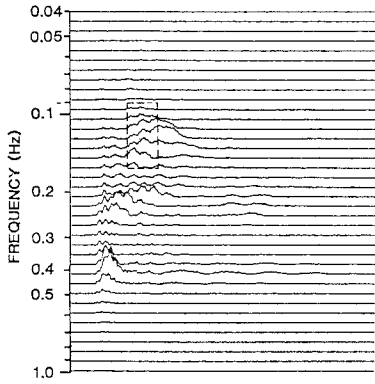
図10には、図9に示す推定地震動の最大水平変位の生じる方向 (N123°E) の加速度波の非定常パワースペクトルと上下成分の非定常パワースペクトルを示す。なお、非定常パワースペクトルの算出に当たっては亀田²³⁾が提案した方法を用いた。図10に示すように、約0.2Hz近傍と約0.1Hz近傍の周波数において、分散性が見られる。周波数約0.2Hz近傍の分散性は、上下成分の非定常パワースペクトルにおいて明確に表れている。

図11には、図10において破線で囲んだ周波数・時間帯の水平 (NS-EW) 成分および上下-NS成分と上下-EW成分の変位波に関する軌跡を示す。同図から、これらの軌跡は表面波に特有の楕円軌跡を示しており、Rayleigh波やLove波が存在していることが判断できる。これらの結果より、断層の破壊開始後約40秒でRayleigh波が、約70秒でLove波が強く励起されており、表面波の影響が卓越していることがわかる。これらの表面波が到達する以前の時刻においては分散性が明瞭に見られないため、実体波が主に励起されたものと考えられる。

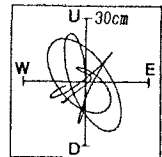
また、図12は、図9(a)の変位合成波に影響をおよぼす断層面上の各点震源から発生する要素波を示したものである。この図から判断して、断層の破壊開始後約80秒以内では主に深く (約10km~15km) で破壊開始点近傍の点震源から、その後は比較的浅い点震源から、地震波は発生しているものと考えられる。



(a) 水平 (NS-EW)



(b) 上下-NS



(c) 上下-EW

(a) 最大水平変位の生じる方向
(N123°E)の成分

(b) 上下成分

図10 東京での非定常パワースペクトル

図11 変位波の軌跡

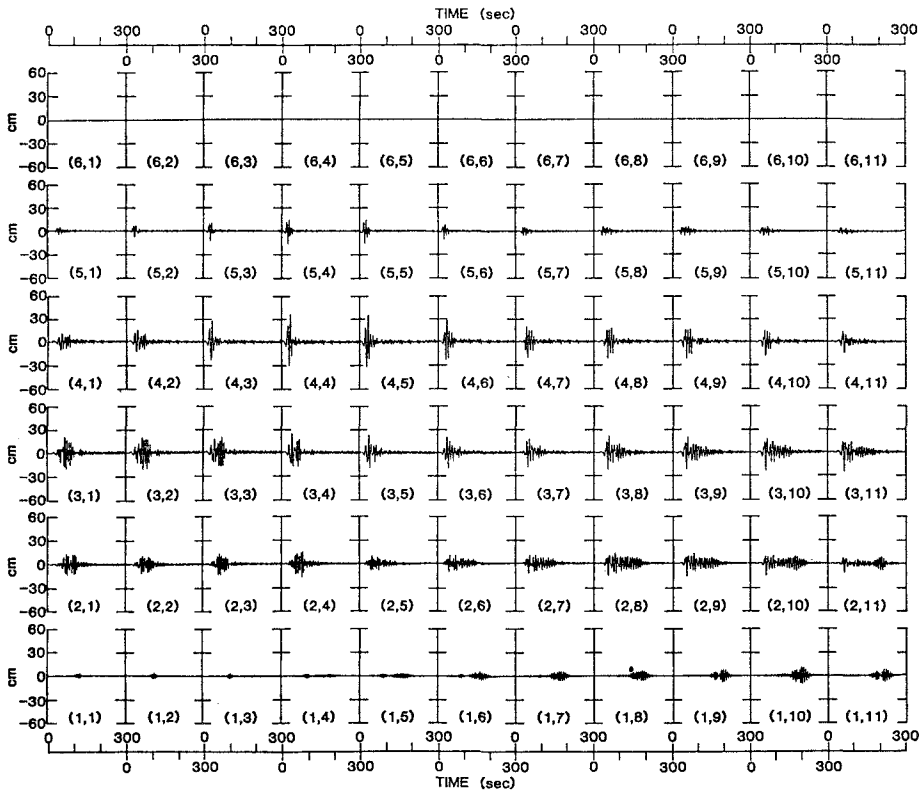
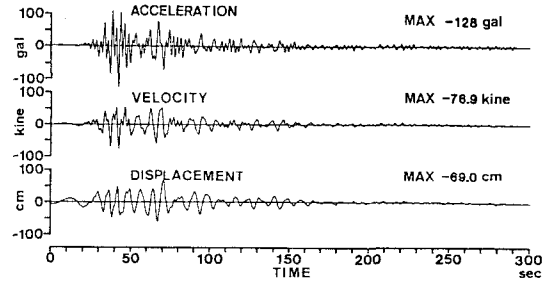


図12 東京で最大水平変位が生じる方向 (N123°E)の要素波

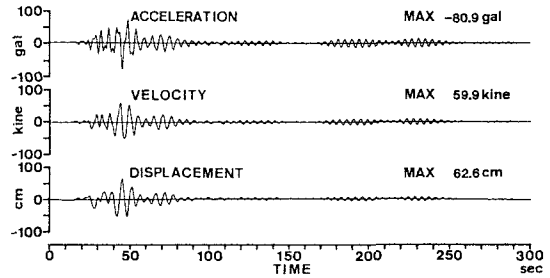
(5) P地点(千葉県)での地震動の推定

図13には、P地点の推定地震動の水平成分と上下成分の地震波形(変位・速度・加速度波)を示す。P地点は、図2に示したように、震源の直上に位置している。図13の水平成分の地震波は、最大変位の生じる方向の波形を示したものである。最大変位は、N128°Wの方向で生じている。P地点における最大変位は約70cm、最大速度は約80kine、最大加速度は約130galとなっている。

P地点においては、図10に示す東京の非定常パワースペクトルと異なり、分散性が明瞭に見られず(紙面の関係で省略する)、実体波の寄与による影響が大きかった。このことは、図14に示すように、各点震源から発生する要素変位波からも明らかである。この図から、P地点の変位合成波においては、P地点の近傍の点震源(3,7)を中心にして、断層面上で半径約10km以内の点震源から波のエネルギーが強く励起されている様子がわかる。



(a) 最大水平変位の生じる方向(N128°W)の成分



(b) 上下成分

図13 P地点での推定地震動

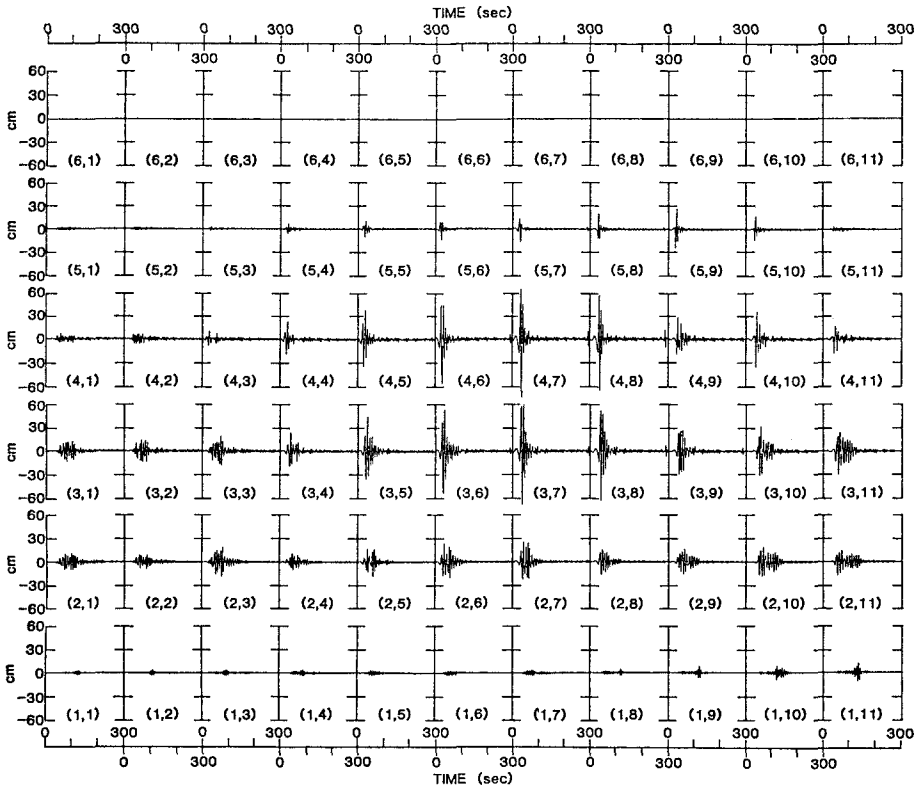


図14 P地点で最大水平変位が生じる方向(N128°W)の要素波

(6) 速度応答スペクトル

東京とP地点の変位波が最大になる方向の地震波に対し、速度応答スペクトル S_v を示したのが図15である。減衰定数は $h=0.5\%$ とした。東京における最大 S_v 値は約380kine（固有周期8.5秒）、震源直上のP地点の最大 S_v 値は約590kine（固有周期6.9秒）となっている。

図15(a)よりわかるように、本解析で求めた東京の地震波による S_v のピークは約4~5秒と約8~9秒に存在している。これは、図3の表面波の分散曲線よりわかるように、Rayleigh波やLove波の表面波の卓越周期に対応している。このような表面波の影響により、これらの周期帯で S_v はピークを示したものと考えられる。なお、これらの周期帯域でスペクトルにピークが存在することは、深さ数kmに達する東京の厚い堆積層に起因するものと考えられ、実観測記録の結果¹⁾とも調和している。一方、東京での実地震波（図8のSW-NE成分）の速度応答スペクトル S_v のピークは周期1.3秒前後にある²²⁾。

解析結果と実地震波による S_v の傾向の違いは、次のように考えられる。まず、実測の S_v 値が約9秒以下でかなり小さいのは、ユーイング型の地震計の特異性によるものであろう。すなわち、地震計の性能に対する問題と振り切れた波形の処理の問題以外に、森岡²²⁾も指摘しているように、特に変位が大きくなると、ユーイング型の水平振子は振子の運動方程式に直交する方向の地動の影響が付加される。シミュレーションによる計算結果では、1.3秒前後の周期でピークが現れていない。これは、ここで取り扱ったような地下構造では期待されがたいものである。工藤¹⁷⁾によれば、伊豆半島と東京間の地盤構造は江ノ島付近で変化していることがわかっている。従って、本研究で扱ったように、震源域から観測点まで一様な成層地盤としてモデル化するのではなく、不規則地盤として取り扱い、また、より深い地盤の情報を導入する必要があるかもしれない。本研究では、図5に示したように断層面上の地震モーメント分布を仮定しているため、図1.2と図1.4より明らかなように、表層と深い震源の影響が弱められている。一方、1.0数秒の波は地震の震源スペクトルにも関係するものと推察される。さらに、計算波形（応答）と観測値に差が生じる理由としては、使用した断層モデルが基本的には測地学データをもとにしているため、本論で対象とする周期帯域まで十分な精度が保てないことも考えられる。すなわち、断層モデルに関する細かい情報量を要するであろう。いずれにしても、シミュレーション結果と観測値の開きには複合した原因が考えられ、さらに検討してみる必要がある。

図15(b)より、P地点においては、周期により S_v 値が大きく変化し、5つの周期（4.3,4.8,5.8,6.9,8.4秒）でピークを示している。これは、観測点から遠い断層上の点震源から励起された表面波の卓越周期（4.1,8.2秒）および震源近傍の影響によるSH波の卓越周期（5~7秒における3つのピークに対応）に相当しているものと考えられる。

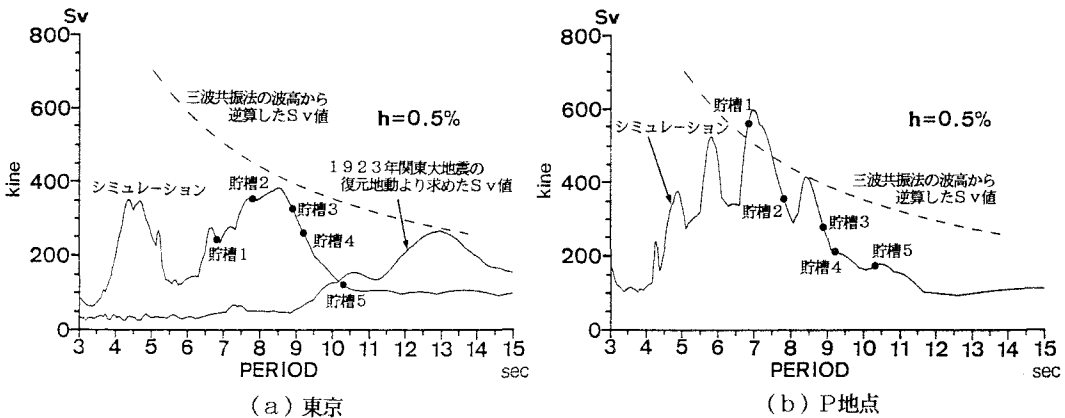


図15 速度応答スペクトル S_v ($h=0.5\%$)

4. スロッシング応答解析

(1) 解析手法・解析対象貯槽

本研究では、スロッシングの応答波高を、軸対称線形ポテンシャル理論²⁴⁾(図16にスロッシングの解析用モデルを示す)により求めた。ただし、モードは10次まで重ね合わせ、減衰定数は0.5%とした。スロッシングの1次～3次モードを図17に示す。

ここで解析の対象とした貯槽は、4万～10万k l容量の5種類である。貯槽諸元(直径と液深)およびスロッシングの固有周期(1次と2次モード)を表3に示す。入力地震波は、図9および図13に示すように、東京とP地点の変位波が最大になる方向の地震波である。

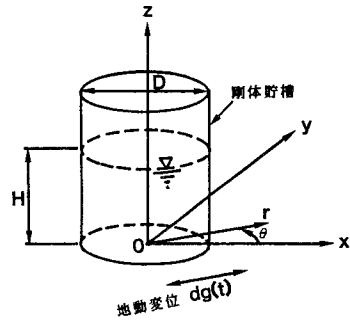


図16 スロッシングの解析モデル

表3 貯槽の緒元とスロッシングの固有周期

| | 直径 D(m) | 液深 H(m) | 固有周期T(sec) | |
|-----|------------|------------|------------|-----|
| | | | 1次 | 2次 |
| 貯槽1 | 42.0 | 28.9 | 6.8 | 4.0 |
| 貯槽2 | 51.5 | 24.0 | 7.8 | 4.4 |
| 貯槽3 | 62.0 | 21.5 | 8.9 | 4.8 |
| 貯槽4 | 62.0 | 18.3 | 9.2 | 4.8 |
| 貯槽5 | 76.0 | 22.0 | 10.3 | 5.4 |

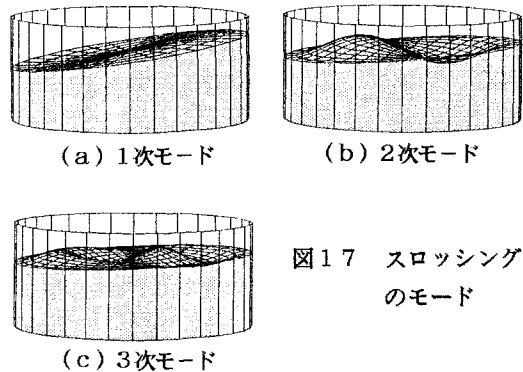


図17 スロッシングのモード

(2) 解析結果

表4には、各地点の各貯槽に対するスロッシング最大波高を示した。また、その最大波高の生じた時刻を()内に示した。表中に示す三波共振による波高は、片振幅60cmの共振正弦波の変位波形を三波入力したときの波高である。

東京では、貯槽3において最も高い6.2mの波高が発生するが、この波高は三波共振入力時の約70%の波高となっており、すべての貯槽において三波共振入力時の波高を下回る。図15(a)に三波共振時の波高から逆算したSv値を破線で、また各貯槽の固有周期に対応するSv値を●で示した。この図から

わかるように、東京での推定した地震波のSv値は三波共振時の波高から逆算したSv値を下回っており、ここでの5種類以外の固有周期をもつ貯槽でも、東京においては三波共振時の波高を上回ることはない。

P地点では、貯槽1において最も高い9.4mの波高が発生する。この波高は三波共振入力時の約115%の波高となっており、三波共振入力時の波高を上回っている。他の4貯槽においては、三波共振入力時の波高を下回っている。図15(b)にも図15(a)と同様、三波共振時の波高から逆算したSv値と各貯槽の固有周期に対応するSv値を示した。P地点での推定した地震波のSv値のピークは、7秒近傍で三波共振時の波高から逆算したSv値を上回っている。この図から、この近傍に固有周期をもつ貯槽は三波共振入力時の波高を上回る可能性があることがわかる。

図18と図20には東京とP地点の貯槽側壁における波高の時刻歴応答解析結果を、図19と図21には最大波高の生じる時刻前後の波面モードを示す。各図中、(a)～(e)は貯槽1～貯槽5の結果である。

表4 最大波高とその出現時刻

| | 東京 | P地点 | 三波共振 |
|-----|-----------|-----------|------|
| 貯槽1 | 4.1 (63) | 9.4 (99) | 8.2 |
| 貯槽2 | 6.0 (107) | 6.6 (74) | 7.8 |
| 貯槽3 | 6.2 (91) | 5.3 (119) | 7.1 |
| 貯槽4 | 4.7 (79) | 3.5 (120) | 6.6 |
| 貯槽5 | 2.3 (70) | 3.4 (102) | 6.5 |

m (sec)

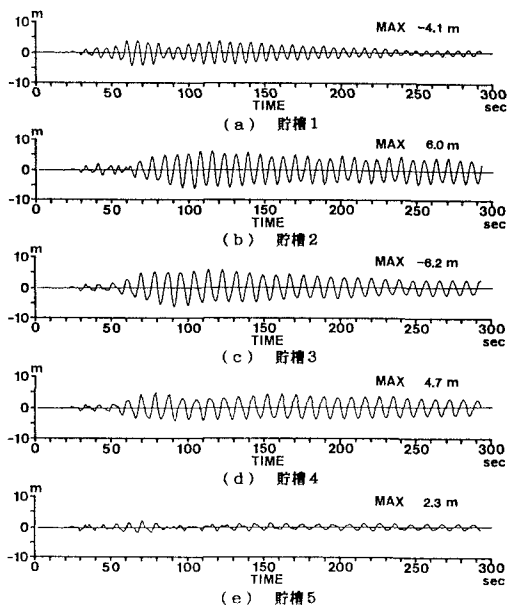


図18 東京の貯槽側壁における波高の時刻歴応答解析結果

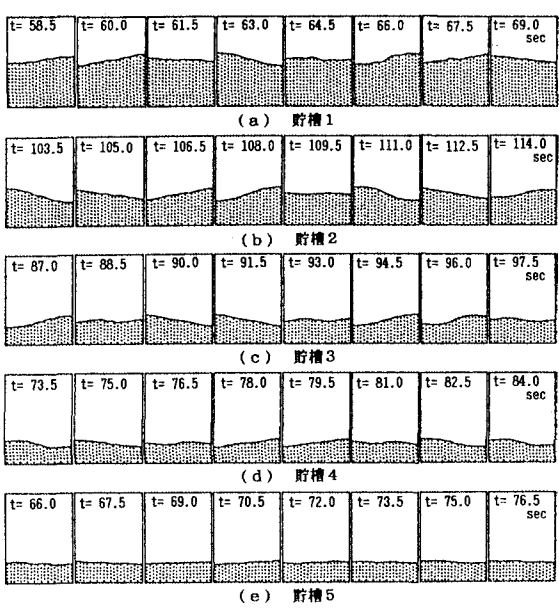


図19 最大波高の生じる時刻前後の波面モード

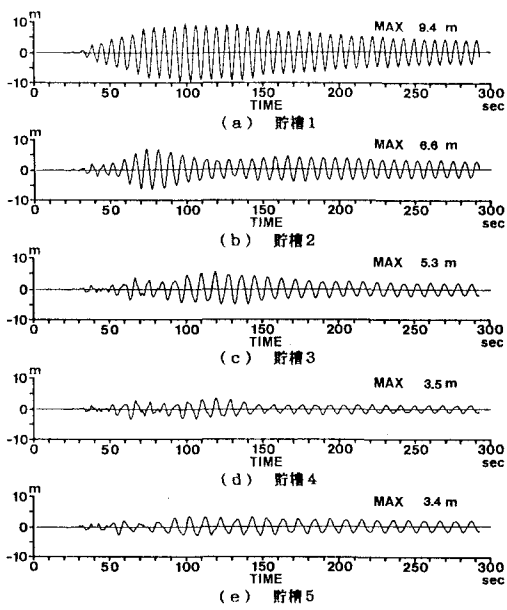


図20 P地点の貯槽側壁における波高の時刻歴応答解析結果

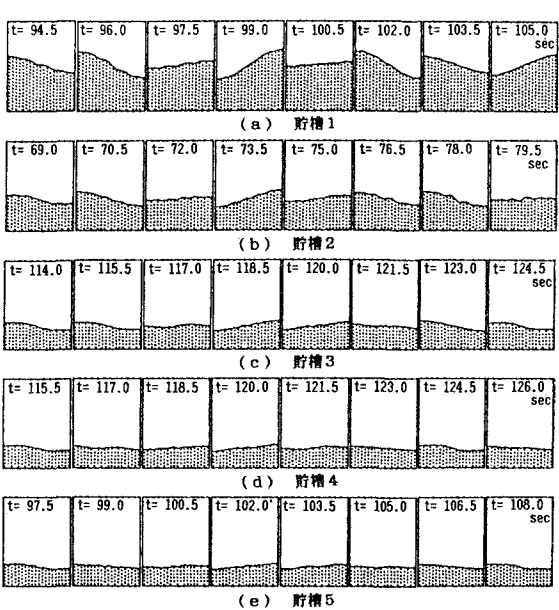
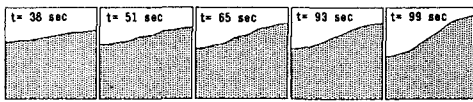
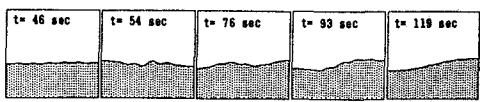


図21 最大波高の生じる時刻前後の波面モード



(a) 貯槽1



(b) 貯槽2

図22 P地点でのスロッシング波の発達状況

図18(a)と図20(a)の波形は貯槽1の各地点の応答波高であり、両図から、同一貯槽においても波高の発達過程が異なることがわかる。P地点では、1次モードで徐々にスロッシング波高が発達し、約100秒後に最大波高となり、その後時間とともに減衰している。それに対し、東京においては、約60秒後に一度発達して最大波高になり、その後波高が減少し、また発達する過程をたどっている。東京の貯槽1において、一度発達して最大波高になり、その後波高が減少する現象は、次のように考えられる。すなわち、約70~100秒の時刻において、貯槽1のスロッシングの固有周期と入力地震波に含まれる周期成分の違いにより、地動がスロッシングの発達をおさえる方向に働くためである。一方、P地点においては、貯槽1のスロッシングの1次固有周期に近い周期成分が多く含まれているため、ほとんど1次モードで発達するものと考えられる。

図20の(a)と(c)の波形から、同一地点(P地点)の貯槽諸元の影響による発達過程の違いが読みとれる。貯槽1においては、最初から1次モードで徐々に発達し、最大波高に達する。一方、貯槽3においては、1次モードに高次モードの波がのって発達し、最大波高に達した後は、ほとんど1次モードにより振動している。この発達状態の違いの波面形状を示したのが図22である。図22(a)より、貯槽1が1次モードで時間の経過とともに発達している状態が、また、図22(b)より、高次モードの波が卓越して発達している状態が読みとれる。貯槽3では、 $t=76$ 秒、93秒においてスロッシング波の2次モードが明確に現れている。これは、図15(b)において、貯槽3のスロッシングの2次の固有周期(4.8秒)近傍にSv値の大きなピークが存在することからも理解できる。また、 $t=93$ 秒においてはスロッシング波の2次モードが卓越しているため、その時刻における貯槽の最大波高は貯槽側壁ではなく、貯槽の中心部寄りの位置に発生している。

5. あとがき

本研究では、理論地震記象によるスロッシング応答解析の一つの試みとして、松浦らが提案した1923年関東大地震の断層モデルにDWF E法を適用して、震源直上地点でのやや長周期の地震波を推定し、さらに4万~10万k lの貯槽にこれらの地震波を入力して、そのスロッシング挙動を求めた。本研究の特徴は、このように、震源直上での地震波を断層モデルと波動理論により求めることにより、スロッシング応答解析を実施したことである。

得られた主な成果をまとめると、次のようになる。

- 1) 本手法による推定地震動の妥当性を検討するため、東京で得られた観測地震波と比較した結果、計算で求めた変位波と速度波の最大値においては良い一致をみた。また、東京では、加速度の非常低パワースペクトルと速度応答スペクトルSv ($h=0.5\%$)の結果から、表面波がスロッシングの発生波高に大きな影響を与えていることが明らかになった。
- 2) 震源直上のP地点(千葉県)における推定地震動の水平最大変位は約70cmであり、P地点の近傍における断層面上の震源より励起された実体波の影響が大きかった。また、速度応答スペクトルには四つの卓越したピークが存在し、周期によりSv値は大きく変化していた。
- 3) スロッシングの応答解析の結果、貯槽の諸元によって発生波高は異なるが、東京で2.3~6.2m、震源直上のP地点(千葉)では3.4~9.4mのスロッシング最大波高の発生が予測された。

本研究では、DWF E法と断層モデルを用いて震源直上地点でのやや長周期の地震波を推定することが可能で、地震記録の少ない震源近傍でのスロッシング挙動の解明に有効なことを示した。今後、断層パラメーターや地盤構造の変化が地震波やスロッシング挙動に及ぼす影響などを明らかにし、推定精度を高めていく予定である。

参考文献

- 1) 田中貞二・吉沢静代・大沢胖・やや長周期帯域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, Vol.54, pp.629~655, 1979.
- 2) 井上涼介・藤野陽三・松原勝巳・伯野元彦: 断層震源モデルを適用した周期10秒前後の地震動評価の試み, 土木学会論文報告集, 第317号, pp.47~60, 1982年1月.
- 3) (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報告書, 昭和57年12月.
- 4) 片山恒雄(研究代表者): 長周期(約2~20秒)地震動の工学的特性に関する総合研究, 昭和59年度科学研究費補助金(総合研究(A))研究成果報告書, 昭和60年3月.
- 5) 山田善一・野田茂・富本信: 日本海中部地震時の気象庁1倍強震計記録に基づく周期10秒前後の地震動特性, 京都大学防災研究所年報, 第28号B-2, pp.33~61, 昭和60年4月.
- 6) 井上涼介: やや長周期帯域における設計用入力地震動研究の展望, 土木学会論文集, 第317号/I-6, pp.1~23, 1986年10月.
- 7) 通商産業省告示第515号: 高圧ガス設備等耐震設計基準, 官報, 号外第93号, pp.3~28, 昭和56年10月26日.
- 8) 通商産業省通達57立局第23号: 6高圧ガス設備等耐震設計基準の運用及び解釈について, 昭和56年1月22日.
- 9) Olson, A.H., Orcutt, J.A. and Frazier, G.A.: The discrete wavenumber/finite element method for synthetic seismograms, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol. 77, pp. 421~460, 1984.
- 10) Imagawa, K., Mikami, N. and Mikumo, T.: Analytical and semi-empirical synthesis of near-field seismic waveforms for investigating the rupture mechanism of major earthquakes, J. Phys. Earth, Vol. 32, pp. 317~338, 1984.
- 11) 山田善一・野田茂: 離散型波数有限要素法を用いた地震動のシミュレーション, 自然災害科学, Vol. 5, No. 2, pp. 35~60, 1986.
- 12) Ando, M.: A fault-origin model of the great Kanto earthquake of 1923 as deduced from geodetic data, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 49, pp. 19~32, 1971.
- 13) Ando, M.: Seismo-tectonics of the 1923 Kanto earthquake, J. Phys. Earth, Vol. 22, pp. 263~277, 1974.
- 14) Kanamori, H.: Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 49, pp. 13~18, 1971.
- 15) Matsu'ura, M., Iwasaki, T., Suzuki, Y. and Sato, R.: Statical and dynamical study on faulting mechanism of the 1923 Kanto earthquake, J. Phys. Earth, Vol. 28, pp. 119~143, 1980.
- 16) 嶋悦三・柳沢馬住・工藤一嘉・吉井敏尅・瀬尾和大・黒羽公明: 東京の基盤構造 その3 第4回, 第5回夢の島爆破実験による地下深部探査, 地震研究所彙報, Vol. 53, pp. 305~318, 1978.
- 17) 工藤一嘉: 正規モード解による強震地動の研究とその応用, 東北大学博士論文, 1979年9月.
- 18) 鎌田晟雄・大石博・関口宏二: 埋設管路の三次元的地震時挙動観測(III)-三次元 μ -観測による表面波の位相速度と下町配水幹線の耐震性の検討-, 水道協会雑誌, 第56巻, 第5号, pp. 39~53, 昭和62年5月.
- 19) Aki, K. and Richards, P.G.: Quantitative Seismology Theory and Methods, Vol. II, Chapt. 14 The seismic source: Kinematics, pp. 799~849, W.H. Freeman and Co., 1980.
- 20) Day, S.M.: Finite element analysis of seismic scattering problems, Ph.D. Thesis, University of California at San Diego, 1977.
- 21) 斎藤正徳: 漸化式ディジタル・フィルターの自動設計, 物理探査, 第31巻, 第4号, pp. 112~135, 昭和53年8月.
- 22) Morioka, T.: The ground motion of the Great Kanto earthquake of 1923, 日本建築学会論文報告集, 第289号, pp. 79~91, 昭和55年3月.
- 23) 亀田弘行: 強震地震動の非正常パワースペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第235号, pp. 55~61, 1975年3月.
- 24) 曾我部潔・柴田碧: 円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第1報 -基礎式と正弦波解-, 生産研究, 第26巻, 第3号, pp. 31~34, 1974年3月.

(1987年10月16日受付)