

# 海底面の変動により生成される津波

理工学域工学系 柿沼 太郎 ・ 工学部 鶴留 悠暉

## 1. 研究の背景及び目的

海底地震に伴う津波の伝播解析は、通常、初期海面変位を海底面の永久変位と等しく設定して開始する。すなわち、asperity や走向の分布を考慮して、幾つかの segment に分割した断層形状を設定し、推定された断層運動によって生じる海底地震後の地盤の永久変位を算出する。そして、これを海面変位の初期条件として、津波伝播の数値計算を開始する。ところが、断層の一つの segment の破壊に対しても、津波は、時間に依存する過程を経て生成する。例えば、海底面の変形が比較的緩慢に進行する場合、津波が生成すると同時に伝播するため、変形後の海底地形と異なる海面形が形成されることは、想像に難くない。すなわち、海底面の永久変位が等しくても、その変位速度の違いにより、異なる水面形が形成される (e. g. 柿沼・秋山, 2006)。

また、海底地震の発生後に来襲するであろう津波の規模は、気象庁の量的津波予報により予測されるが、海底地震が津波地震であるならば、量的津波予報の予測値を大きく上回る規模の津波が到来する可能性がある。津波地震の未解明な点を明らかにするためにも、津波の生成過程に着目する必要があると考えられる (柿沼, 2006)。

そこで、本研究では、底面の隆起、または、沈降に起因する津波の、鉛直断面内の生成過程を対象として、底面変動装置を有する水槽を用いた水理実験と、非線形浅水方程式系に基づく数値解析を行ない、底面変動や静水深の条件の違いが、生成される津波の特性に与える影響を調べる。

## 2. 水理実験の概要

水理実験では、図-1 に示すような、底面変動装置を有する水槽を用いた。本水槽は、U字型の外水槽と、水面変動を測定する内水槽からなる 2 重構造の水槽である。このうち、前者は、底面下の部分を含む。底面下に配置された 6 個の直方体型のユニットは、ユニット上面に接続したワイヤをサーボ・モータにより一定速度でそれぞれ独立に上昇させることができる。ユニットの番号を左から順に①～⑥とする。上昇したユニットの下方には、U字型の外水槽内の水が入り込み、内水槽内の水が外水槽内に殆ど浸入しないことを確認した。ユニットを上昇させる速度、時間及び高さをそれぞれ底面の隆起速度、隆起時間及び隆起量と呼ぶことにする。他方、ユニットを降下させる速度、時間及び深さは、それぞれ、底面の沈降速度、沈降時間及び沈降量と呼ぶ。

また、水面変動の測定には、レーザ式波高計を用いた。ポンプで水面に降着させたアルミ・パウダを反射材とし、これにレーザ光を照射して水面変動を測定した。3 台のレーザ式波高計を各ケースで 3 地点に設置した。ただし、本報告では、ユニット④の中央位置における水面変動のみを示す。PC のプログラムに入力した底面の隆起条件に基づき、サーボ・モータが回転して各ユニットが上昇し始め、同時にレーザ式波高計による測定が開始される。こうして測定されたデータを増幅して A/D コンバータで変換することにより、水面変動のデータを得る。

本研究では、底面の変動速度は、時間に関して一定とする。底面が隆起する場合を対象とする際には、静水深が一様である状態を初期状態とし、隆起領域のユニットを上昇させる。他方、底面が沈降する場合を対象とする際には、沈降領域のユニットを上昇させてから止め、静水状態となるまで待ち、これを初期状態として、上昇させたユニットを降下させる。

なお、本研究の実験条件において、底面の変動量と、静水深の比に関しては、実際の海底地震津波における条件、すなわち、(数メートル) / (数キロメートル) といったスケールと比較して、1 オーダ～数オーダ大きくなっている。しかしながら、(底面の変動域の幅) / (静水深) は、実際の条件である 1～10 程度のオーダと類似したスケールであると言える。粘性の効果を無視して Froude の相似則を用いると、底面の変動域の幅の縮尺を  $\lambda$  として、底面の変動速度及び変動時間の縮尺は、ともに  $\lambda^{1/2}$  となる。従って、 $\lambda = 10^{-4}$  と考えると、 $\lambda^{1/2} = 10^{-2}$  となるから、実験における変動速度 20 mm/s 及び変動時間 1 s は、実スケールにおいて、それぞれ、2 m/s 及び 100 s と

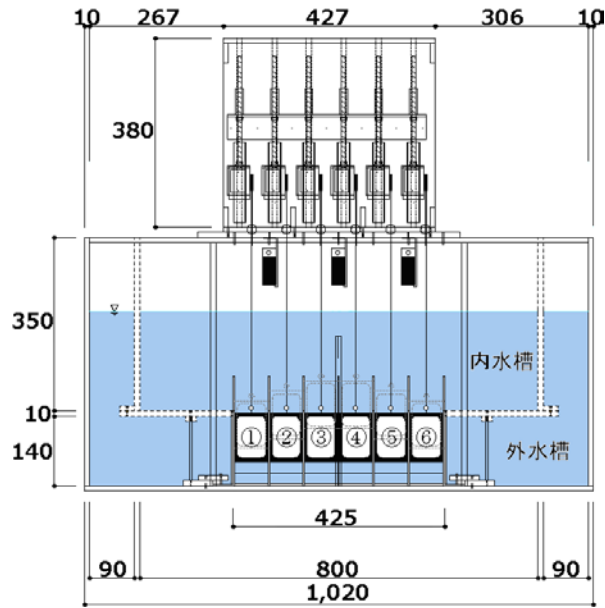


図-1 底面変動装置を有する津波生成水槽（長さの単位：mm）

なる。

### 3. 数値解析の概要

数値解析において適用する基礎方程式系は、次式で表わされる連続の式及び Bernoulli の式である。

$$\partial \zeta / \partial t = \partial b / \partial t - \nabla [(\zeta - b) \nabla \phi] \quad (1)$$

$$\partial \phi / \partial t = -[g \zeta + (\nabla \phi)^2 / 2] \quad (2)$$

ここで、 $\zeta$ 、 $b$ 、 $\phi$  及び  $g$  は、それぞれ、水面変動、底面位置、速度ポテンシャル及び重力加速度である。重力加速度は、 $9.8 \text{ m/s}^2$  とする。また、 $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y)$  は、水平方向の微分演算子である。

本研究では、鉛直断面内の流体運動を対象とし、底面変動の条件を式(1)の底面位置  $b(x, t)$  に与える。前進差分を用いた陽解法により、式(1)及び式(2)を解く。初期状態における流速は、至る所で0であるとする。そして、式(1)より、次の時刻の  $\zeta$  を求め、式(2)より、次の時刻の  $\phi$  を求める。これを繰り返して、新しい時刻の物理量を順次求めていく。なお、側方境界には、完全反射条件を課す。

### 4. 底面の隆起幅が生成される津波に与える影響

表-1 に、Case A-1 及び Case A-2 における静水深及び底面変動の条件を示す。水理実験では、Case A-1 でユニット③のみを上昇させ、Case A-2 でユニット②及び③を同時に上昇させた。両者の場合の水面変動の結果を図-2 に示す。なお、本報告では、水面変動として、ユニット④の中央位置における値を示し、プロットが水理実験結果を表わし、一方、実線が同条件に対する数値解析結果を表わすものとする。また、静水深が  $h$  である水域における津波の位相速度を  $\sqrt{gh}$  と仮定し、壁面で反射した波の影響がない時間内の結果を示す。図-2 より、隆起幅の長い Case A-2 で、各地点における水面変動の最大値である津波高さがより大きいが、津波前面の水面勾配には、両者に殆ど違いがないことがわかる。

### 5. 底面の隆起速度が生成される津波に与える影響

表-2 に、Case B-1～Case B-3 における静水深及び底面変動の条件を示す。水理実験では、ユニット③を上昇させた。これらの場合の水面変動の結果を図-3 に示す。これより、隆起速度が大きい

表-1 Case A-1 及び Case A-2 における静水深及び底面変動の条件（水理実験では，Case A-1 でユニット③のみを上昇させ，Case A-2 でユニット②及び③を同時に上昇させた．）

Case	静水深	隆起幅	隆起速度	隆起量
A-1	80 mm	65 mm	40 mm/s	40 mm
A-2		130 mm		

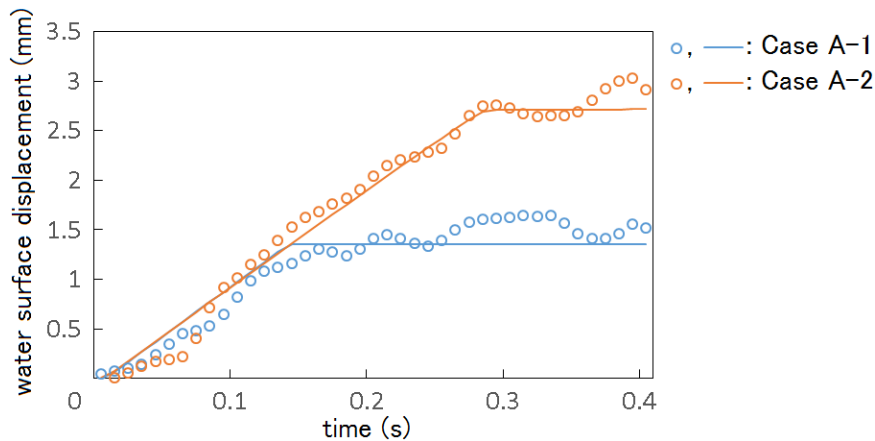


図-2 Case A-1 及び Case A-2 におけるユニット④の中央位置の水面変動（○：水理実験結果，—：数値解析結果）

表-2 Case B-1～Case B-3 における静水深及び底面変動の条件（水理実験では，ユニット③を上昇させた．）

Case	静水深	隆起幅	隆起速度	隆起量
B-1	80 mm	65 mm	10 mm/s	40 mm
B-2			20 mm/s	
B-3			40 mm/s	

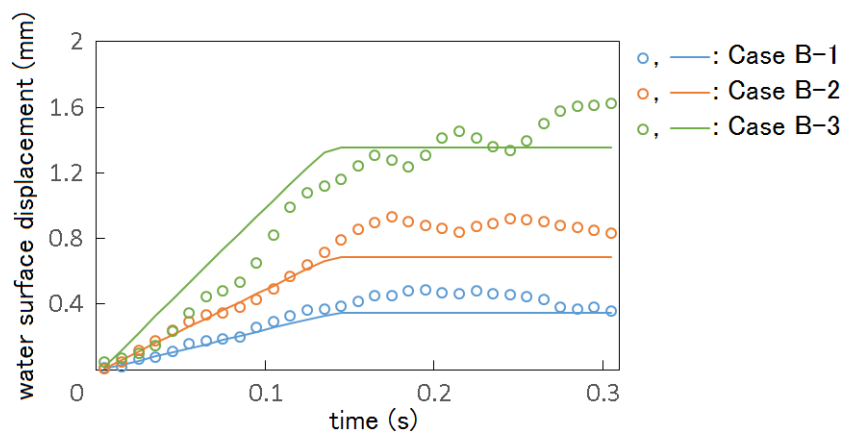


図-3 Case B-1～Case B-3 におけるユニット④の中央位置の水面変動（○：水理実験結果，—：数値解析結果）

くなるにつれて，津波高さが大きくなり，津波前面の水面勾配も大きくなることわかる．津波前面の水面勾配は，伝播過程における津波の変形に影響する．

## 6. 静水深が生成される津波に与える影響

表-3 に，Case C-1～Case C-4 における静水深及び底面変動の条件を示す．水理実験では，ユニ

表-3 Case C-1～Case C-4 における静水深及び底面変動の条件（水理実験では、ユニット③を上昇させた。）

Case	静水深	隆起幅	隆起速度	隆起量
C-1	40 mm	65 mm	30 mm/s	30 mm
C-2	60 mm			
C-3	80 mm			
C-4	100 mm			

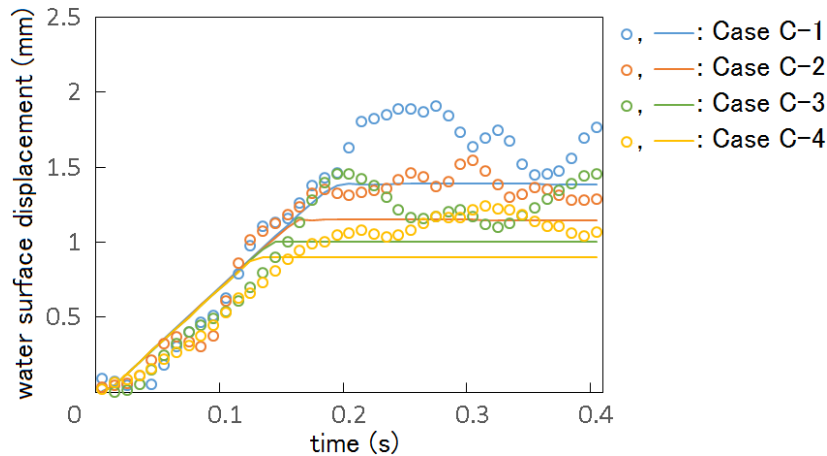


図-4 Case C-1～Case C-4 におけるユニット④の中央位置の水面変動（○：水理実験結果，—：数値解析結果）

表-4 Case D-1～Case D-4 における静水深及び底面変動の条件（水理実験では、ユニット③を上昇させた。）

Case	静水深	沈降幅	沈降速度	沈降量
D-1	70 mm	65 mm	23 mm/s	50 mm
D-2				60 mm
D-3	80 mm			50 mm
D-4				60 mm

ット③を上昇させた。これらの場合の水面変動の結果を図-4 に示す。静水深が最も浅い Case C-1 で津波高さが大きい。また、津波高さは、いずれの場合においても、水理実験結果が数値解析結果より大きく、特に、Case C-1 で、両者の差が大きい。これは、式(1) 及び式(2) に基づく非線形浅水モデルでは、鉛直方向の流速分布や加速度が相対的に有意になると、解の精度が低下するためであると考えられる。また、数値解析結果では、水理実験結果に見られる短周期の変動も再現されていない。

### 7. 底面の沈降により生成される津波

海底地震津波の生成過程においては、海底面の隆起と沈降の両者が発生することが多い。また、海底噴火に伴うカルデラの形成時には、海底面が沈降する。そこで、Case D-1～Case D-4 の水理実験では、ユニット③を予め上昇させておき、静水状態としてから、ユニット③を一定速度で下降させ、底面の沈降によって津波を生成させた。Case D-1～Case D-4 における静水深及び底面変動の条件を表-4 に、また、水面変動の結果を図-5 に示す。ここで、破線は、各場合における水理実験結果の対数近似曲線を示す。これより、静水深が浅く、沈降量の大きな Case D-2 において、水面の低下量の最大値が最も大きいことがわかる。

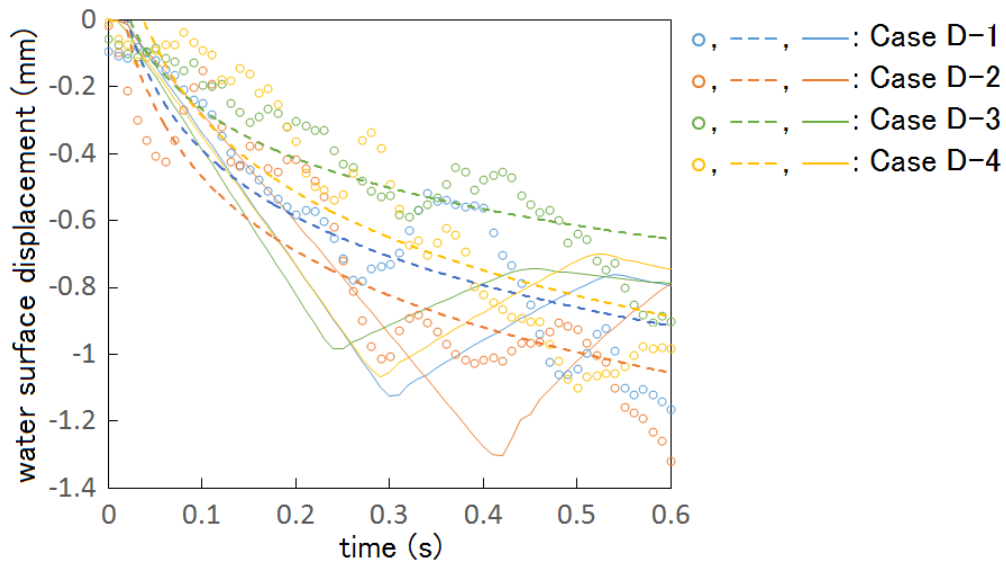


図-5 Case D-1～Case D-4 におけるユニット④の中央位置の水面変動 (o: 水理実験結果, ---: 水理実験結果の対数近似曲線, —: 数値解析結果)

**謝辞:** 本研究で用いた水槽の製作, 並びに, 水理実験の実施にあたり, 鹿児島大学大学院理工学研究科技術部の種田哲也技術職員に御協力いただいた. ここに, 感謝の意を表す.

#### 参考文献

- 柿沼太郎: 津波地震がもたらす幾つかの地変形態を対象とした津波形成過程の数値解析, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 191-195, 2006.
- 柿沼太郎・秋山 実: 海底地形の変動に伴う津波発生過程の数値解析, 土木学会論文集, Vol. 62, pp. 388-405, 2006.