津波生成の水理実験と数値解析

鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 入船裕丞
鹿児島大学大学院理工学研究科 正会員 柿沼太郎
鹿児島大学工学部 学生会員 山元 公
鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 山下 啓

1. 序　論: 海底地震に伴う津波の伝播計算は，通常，初期水面形の仮定から始まる．すなわち，断層運動に伴う海底地震後の地盤の永久変位を算出して，この変位を初期水面変位と仮定し，初期流速が至る所でないものとして津波伝播の数値計算を開始するのである．ところが，津波は，時間に依存する過程を経て生成する．従って，海底の永久変位が等しくても，その変位速度が緩やかである場合と，速い場合とでは，異なる水面形が形成されることになる．そこで，海底地形の変動に伴い水面波が形成される現象を対象として，非線形波動方程式系に基づく数値解析を行なう．ところで，岩瀬（2005）は，Boussinesq 型方程式系の分散項の違いが，津波伝播の解析結果に影響を与えることを示した．本研究では，速度ポテンシャルを静水面からの鉛直距離のべき級数に展開して，考慮する展開項を変えた数値計算を行ない，流速分布の正確さの違いが数値計算結果に与える影響を検討する．なお，本数値モデルは，Hammack（1973）による水理実験結果との比較により，その妥当性が示されている（柿沼・秋山, 2006）．また，津波生成装置を有する水槽を製作し，水理実験と数値解析結果とを比較し，更に，水理実験と数値解析の両側面から，津波の生成・伝播過程の水面波形に関して調べる．

2. 基礎方程式系と数値解析法: 非粘性かつ非圧縮性である流体の非回転運動を対象とする．速度ポテンシャルを $\phi(x,z,t)=\sum_{\alpha=0}^{N-1}\{f_\alpha(x,t)\cdot z^\alpha\}$ のように N 個のべき関数の重み付き級数に展開する．変分法を適用して得られた非線形波動方程式系（柿沼ら, 2011）に基づき，時間発展に Nakayama・Kakinuma（2010）に類似した差分法を用いて数値解析を行なう．

3. 水理模型実験装置: 津波生成装置を有する水槽を**図-1** に示す．これは，二つの L 字型の内水槽を有する製作した 2 重底構造の水槽である．底面下に配置された①～⑥の UNIT は，上面に接続したワイヤにより，それぞれ独立して上昇，また，UNIT 同士を連結しての上昇ができる．隆起速度は，ビデオ撮影画像から 0.1 秒刻みで各 UNIT 上面の位置を読み取って得た．

また，水面変動の測定においては，隆起域の一端のある x =1.3 m の地点と隆起域から離れた x =2.0 m の地点の 2 地点にレーザ式波高計を用いた．水面に降着させたアルミパウダを反射材とし，レーザ光を照射して，ミリメートル単位以下の水面変動を精密に測定することができる．

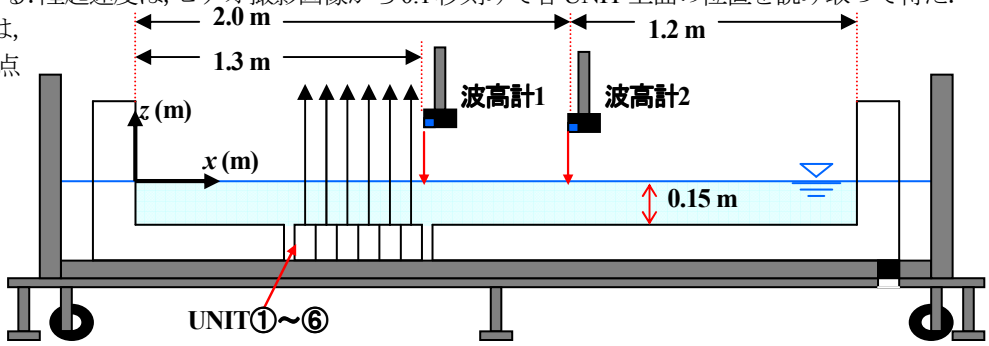

図-1　津波生成水槽

4. 数値解析結果と水理実験結果の比較: 水面変動の水理実験結果と数値解析結果を示す．比較対象とする実験では，UNIT4-6 を連結させ，底面の隆起の与え方を**表 1** (a)，(b) の 2 通りとした．

図－2 (a) に，**平均隆起速度が** 7.40 m/s の場合の各測定点における水面変動の水理実験結果と数値解析結果を示す．速度ポテンシャルの展開項数を $N=1$ とした場合，すなわち，非線形浅水方程式系を用いて分散性を考慮せずに数値解析を行なった場合，x =2.0 m の地点において，計算結果では，実験結果よりも峰のピーク付近が先行している．一方，速度ポテンシャルの項数を N=2，または，3 とした場合には，計算結果が実験結果と比較的よく一致している．ただし，峰のピークから谷にかけて，計算値が実験値よりもやや小さくなっている．

図－2 (b) に，**平均隆起速度が** 3.22 m/s の場合の各測定点における水面変動の水理実験結果と数値解析結果を示す．波形勾配の緩やかな実験結果と対照的に，数値解析結果が大きく先行している．そこで，両地点ともピーク値を揃えてグラフ表記したところ（**図－2** (b)），これらが比較的よく一致した．

5. 水理実験と数値解析: 連結して隆起させた UNIT4-6 に関して，連結を解除し，各 UNIT の隆起速度を変えず，UNIT4 から 5 へ，5 から 6 へと隆起始動のタイミングを Δt = 0.1 s ずつ遅らせた場合の数値解析を行なった．**図-3** に，実験値，同条件での計算結果，タイミングを遅らせた場合の計算結果を示す．N = 3 での同条件下での計算結果が実験値を過大評価している．また，各 UNIT の隆起量，隆起速度を変えず段階的に UNIT を隆起させた数値解析 N = 3 の計算結果が僅かながら高い波高を示した．次に，連結された UNIT4-6 を同時に隆起させる際，隆起途中に UNIT の隆起を大きく加速させた．隆起の与え方を**表-2** に示し，実験結果・数値解析結果を**図-3** に示す．また，それぞれ連結された UNIT1-3 および 4-6 について，UNIT1-3 の隆起後 Δt = 0.9 s の間隔をおいてから UNIT4-6 を隆起させた．そして，底面隆起の速度とタイミングを変えて水理実験を行なった．UNIT への隆起の与え方を**表-3** に，実験結果を**図-5** に示す．**図-4**，5 より，共通して緩やかな水面上昇と急激な水面上昇の 2 段階の水面上昇があり，短周期波成分と長周期波成分が重なり合うような水面変動が見られる．これは，2011

表-1(a) 底面の隆起量

	UNIT4-6
時間t(s)	隆起量(m)
0	0
0.1	0.004
0.2	0.013
0.3	0.025
0.4	0.035
0.5	0.037

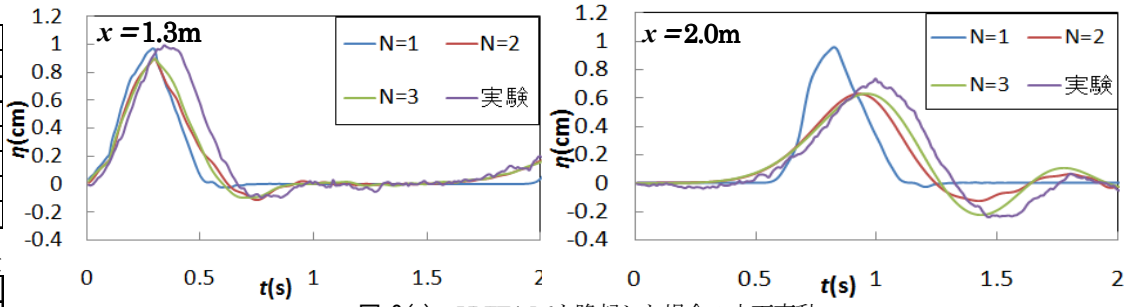

図-2(a) UNIT4,5,6を隆起した場合の水面変動

表-1(b) 底面の隆起量

	UNIT4-6
時間t(s)	隆起量(m)
0	0
0.1	0.001
0.2	0.004
0.3	0.007
0.4	0.011
0.5	0.015
0.6	0.02
0.7	0.023
0.8	0.027
0.9	0.029

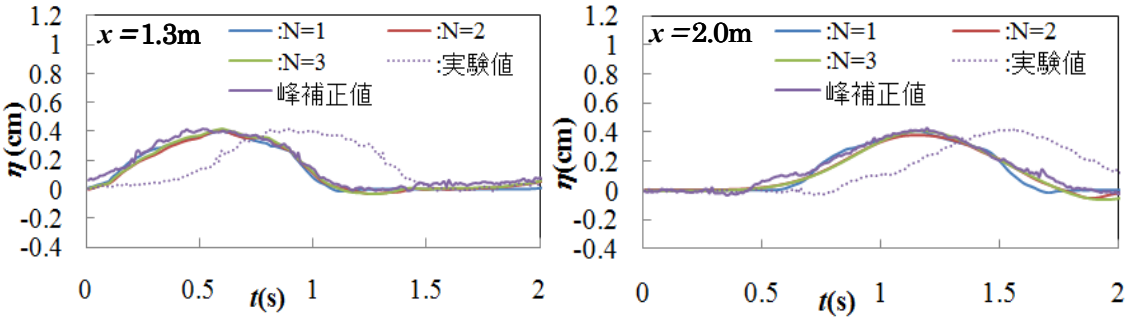

図-2(b) UNIT4,5,6を隆起した場合の水面変動

表-2 底面の隆起量

	UNIT4-6
時間t(s)	隆起高さ(cm)
0	0
0.1	0.1
0.2	0.2
0.3	0.4
0.4	0.5
0.5	0.7
0.6	1
0.7	1.3
0.8	1.6
0.9	2
1	2.4
1.1	2.5

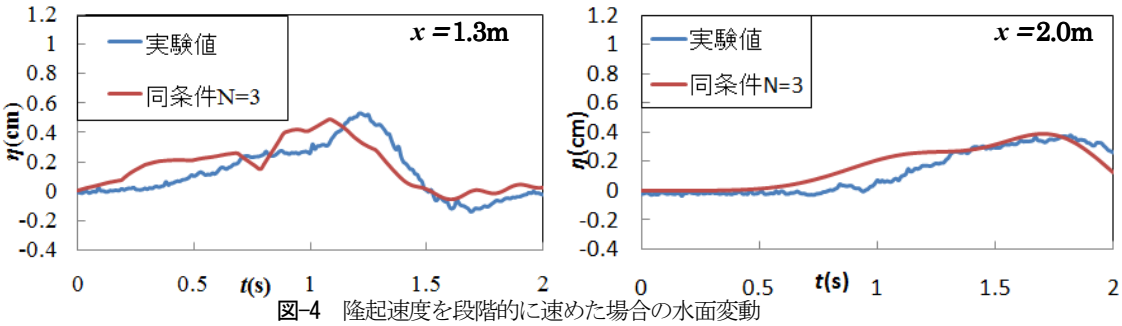

図-4 隆起速度を段階的に速めた場合の水面変動

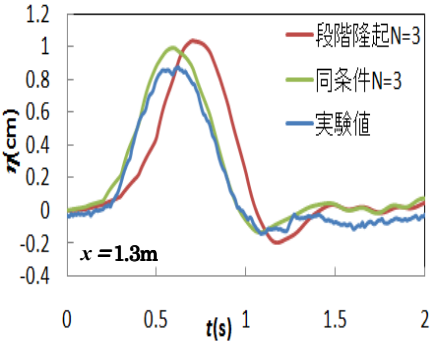

図-3 UNIT4,5,6を段階的に隆起した場合の水面変動

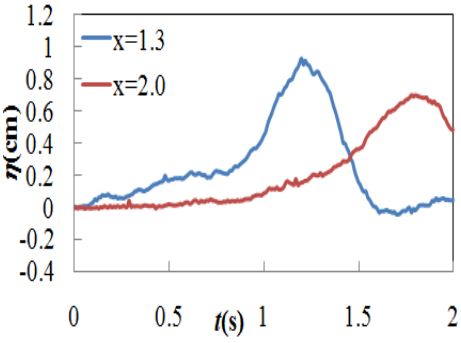

図-5 UNIT4,5,6を段階的に隆起した場合の水面変動

表-3 底面の隆起量

	UNIT1-3		UNIT4-6
時間(s)	隆起高さ(cm)	時間(s)	隆起高さ(cm)
0	0	0.9	0
0.1	0.1	1	0.1
0.2	0.2	1.1	0.5
0.3	0.4	1.2	1.4
0.4	0.5	1.3	2.3
0.5	0.7	1.4	2.9
0.6	1	1.5	3.3
0.7	1.3	1.6	3.3
0.8	1.6	1.7	3.3
0.9	2	1.8	3.3
1	2.4	1.9	3.3
1.1	2.5	2	3.3

年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震津波の水面変動の特徴と類似している．

6. 結　論: 海底地形の変動に伴い水面波が形成される現象を対象として，非線形波動方程式系に基づく数値解析と水理実験を行なった．底面の隆起速度が比較的大きい場合，本数値モデルは，精度良く実験結果を再現した．隆起速度が小さい場合には，解析結果が実験値に先行する波形となったが，波高及び波長は，共に高い再現性を示した．本実験では，隆起速度が比較的速い場合に，周期が短く波高の高い水面波形を有する津波が生成されたが，その波高は，永久変位の 1/4 以下に留まった．また，緩やかな水面上昇と急激な水面上昇の 2 段階の水面上昇のある津波も生成された．更に，底面の変位や変形時間のみならず，隆起速度の変化や，位相差を持つような複雑な隆起が津波高さに影響を及ぼすことがわかった．

参考文献

岩瀬浩之: 津波発生域から沿岸域までの分散効果を取り入れた数値モデルの研究, 東北大学大学院博士論文, 166p., 2005.

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.

柿沼太郎・山下 啓・帖佐繁明・藤間功司・中山恵介: 津波の生成や伝播に対する流速分布及び密度成層の影響, 土木学会論文集 B3（海洋開発）, Vol. 67. 2011.

Hammack, J. L.: A note on tsunamis: their generation and propagation in an ocean of uniform depth, J. Fluid Mech., Vol. 60, pp. 769-799, 1973.