

海底地震の地盤変動に伴う津波発生過程の物理特性

小笠原敏記¹・若松明史²・児玉 烈²・堺 茂樹³

津波予測には、断層パラメータを用いた弾性理論より初期波形を算出し、波高や遡上高の推定が行われている。その予測の精度向上には、地盤変動に伴う初期波形の正確な情報が必要であり、その変動に起因する隆起速度やその範囲などの因子と初期波形の発生過程との関係を知ることが重要である。本研究では、境界要素法と空隙率を考慮した VOF 法の 2 種類の手法より、地盤変動に伴う隆起速度やその範囲と水面波形や最大水面変位との関係を明確にする。その結果、初期波形の最大水位の推定には、水深と隆起速度の関係だけでなく隆起範囲も重要であり、その範囲が水面を上昇させる水塊量の増大に寄与し、津波発生規模を支配する重要な因子と推察される。

1. はじめに

低頻度ではあるが必ず繰り返されて来た津波は、一端発生すれば自然条件や社会情勢により、様々な形態で甚大な被害を及ぼす災害になる。津波の発生を抑止することは困難であるが、その襲来の正確な予測と適切な予報によって、被害を最小限に抑制することは可能である。

従来、津波初期波形の第一次近似として、断層モデルによる地盤変動量を与える方法が検討されて来た(相田, 1974)。そして、現在の津波予測は、観測された地震波から断層長や変位量など、各種断層パラメータを予測し、それらを考慮した弾性理論によって算出される初期波形から、波高や陸域への遡上高を推定している。近年では、津波波源域の初期水位を逆推定法によって算出する試みや(泉宮・吉田, 2002)、数値シミュレーションを用いて、直接地盤変動を与え、それに伴う水面変動の応答特性の検討も行われている(松山・池野, 1995 および柿沼・秋山, 2005)。また、津波予報の精度向上と発表時間の短縮がこれまで以上に要求されることから、海底地震の地盤変動に伴う初期波形の正確な情報が重要と言える。その初期波形の発生過程において、地盤変動に起因する隆起速度や隆起範囲などのパラメータが、その過程にどのような影響を及ぼすかを知る必要がある。

そこで本研究では、境界要素法(BEM)と空隙率を考慮した VOF 法の異なる 2 種類の計算手法を用いて、地盤変動に伴う初期波形の発生過程における非粘性・非回転運動の有無の影響を明らかにするとともに、両手法の精度の比較検証を行う。さらに、地盤変動に起因する隆起速度や隆起範囲と水面波形の変化過程や最大水面変位などとの関係を詳細に検討する。

2. 数値計算手法の概要

地盤変動に伴う津波発生過程の数値シミュレーションには、要素近似によって解かれる BEM と差分近似による VOF 法に空隙率を考慮した手法の 2 種類を用いる。

(1) BEM による計算手法の概要

BEM の基礎式である連続の式は、非圧縮、非粘性流体および渦なし運動と見なすことにより、次式の数値ポテンシャル $\phi(x, z, t)$ に関するラプラス方程式で表される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

さらに、グリーンの公式を適用すると、式(1)は境界積分方程式により次式のように表すことができる。

$$\alpha \cdot \phi + \int_s \left\{ \phi \frac{\partial G}{\partial n} - \phi_n G \right\} ds = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $G = \ln(1/r)$ 、 $\phi_n = \partial \phi / \partial n$ であり、 α は任意の境界点の内角、 n, s は各境界面での法線および接線方向単位ベクトル、 r は要素間の距離である。そして、式(2)に自由水面、底面、両端の開境界面におけるそれぞれの運動学的条件を代入し、計算領域を直線要素に分割して、空間的に離散化した方程式を、各境界の力学的条件と連立して解くことにより、全境界上の速度ポテンシャル ϕ と自由水面の変位 η が求められる。さらに、時間の離散化には Newmark- β 法を用いた。また、両端の開境界上には Sommerfeld 型放射条件を適用した。この詳細な計算手法については、劉・堺(2000)を参照されたい。

(2) VOF 法による計算手法の概要

基礎方程式は、非圧縮性流体を対象とした次式の連続式および N-S 方程式である。

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_w w)}{\partial z} = S_p \dots\dots\dots (3)$$

$$\varepsilon \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_w u w)}{\partial z}$$

1 正 会 員 博(工) 岩手大学助工学部建設環境工学科
2 学生会員 岩手大学大学院工学研究科建設環境工学専攻
3 正 会 員 工博 岩手大学教授工学部建設環境工学科

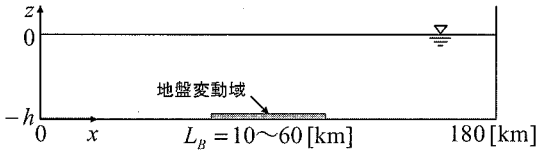


図-1 鉛直2次元波動場の計算領域

表-1 計算条件

水平・鉛直格子幅 Δx [m], Δz [m]	1,000	50
時間間隔: Δt [s]	0.5	
水深: h [m]	1,000, 2,000, 3,000, 4,000	
隆起高: h_B [m]	3.0	
隆起速度: v_B [m/s]	0.01, 0.03, 0.06, 0.1, 0.15, 0.3, 0.6	
隆起距離: L_B [km]	10, 20, 30, 40, 50, 60	

$$= -\frac{\varepsilon}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \dots\dots (4)$$

$$\varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma_x u w)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma_z w w)}{\partial z}$$

$$= -\frac{\varepsilon}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\varepsilon}{\rho} g +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \dots\dots (5)$$

ここで、 t は時間、 x, z は水平・鉛直座標、 u, w は水平・鉛直成分の流速、 ρ は密度、 p は圧力、 ν_e は分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 g は重力加速度、 ε は空隙率、 γ_x, γ_z は水平・鉛直方向の面積透過率である。また、 S_F は造波ソースのための項である。また、水面の位置は、VOF関数 F 値を用いた次式の移流方程式によって求められる。

$$\varepsilon \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma_x u F)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma_z w F)}{\partial z} = S_F \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 S_F は造波ソース項を表す。詳細な手法については、松田ら(1998)および藤間(2003)を参照されたい。

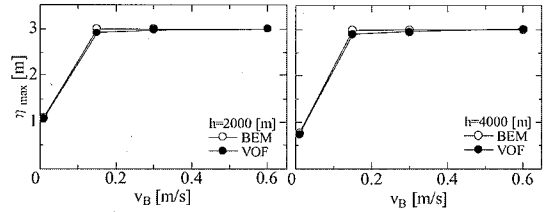
(3) 計算条件

計算領域は、図-1に示すような鉛直2次元波動場の数値水槽を設定し、水平距離 x を180 km、水深 h を1,000 mから4,000 mまでの4通りに変化させた。また、地盤の隆起する位置を水槽中央に固定し、その変動による隆起距離 L_B を10 kmから60 kmまでの範囲で6種類とした。さらに、一様に隆起する部分の地盤変動高 h_B が3 mに達するまで一定の隆起速度 v_B を与え続け、その値を0.01~0.6 m/sの範囲で変化させた。また、水平および鉛直方向の各格子幅(要素点間隔)を $\Delta x=1,000$ mおよび $\Delta z=50$ mとし、時間間隔 Δt を0.5秒に設定して時間発展の計算を行った。計算条件の一覧を表-1に示す。

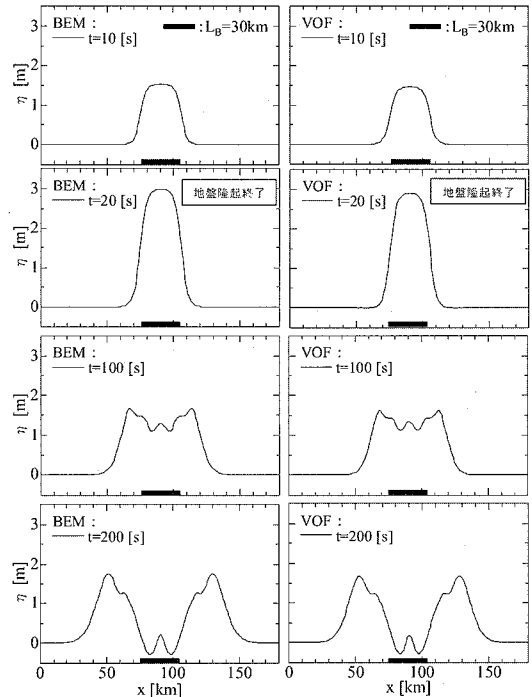
3. 非粘性・非回転運動の影響の有無

ここでは、上記に示した2つの手法による計算結果を基に、津波初期波形に与える非粘性・非回転運動の有無の影響を明らかにするとともに、精度の比較検証を行う。

図-2は、水深 $h=2,000$ mおよび4,000 mでの隆起速度 v_B と最大水面変位 $\eta_{\max}$ との関係について、BEMおよびVOF法による計算結果を比較したものである。何れの水深に対しても両手法によって算出された $\eta_{\max}$ の値には、ほとんど差が見られないことがわかる。次に、


 (a) $h=2,000$ m

 (b) $h=4,000$ m

 図-2 隆起速度 v_B と最大水面変位 $\eta_{\max}$ との関係についてBEMおよびVOF法による計算結果の比較


(a) BEM

(b) VOF

 図-3 BEMとVOF法による水深 $h=4,000$ mにおける $v_B=0.15$ m/sでの地盤変動に伴う水面波形の時間変化の比較

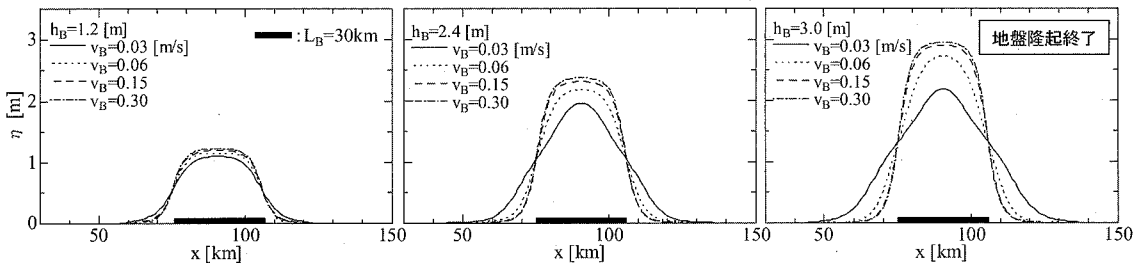


図-4 水深 $h=4,000\text{m}$ における各隆起速度 $v_B (=0.03\text{m/s} \sim 0.30\text{m/s})$ での地盤変動に伴う水面波形の比較

水深 $h=4,000\text{m}$ における隆起速度 $v_B=0.15\text{m/s}$ での水面波形の時間的変化の比較を図-3に示す。図中の $x=75\text{km}$ から 105km までの範囲が隆起距離 $L_B=30\text{km}$ を表している。地盤隆起に伴って水面が上昇し、時刻 $t=20$ 秒の隆起終了後、最大水位に達した水面の低下とともに分裂した波が左右に伝播する様子を両手法とも同様に再現している。

以上より、この程度の格子幅の縦横比 ($1/200$) による津波発生過程の数値計算では、非回転や非粘性の有無による影響は、計算結果に明確な差異を及ぼさないことが明らかである。これ以降では、同条件下でBEMに比べ計算時間が優位となるVOF法を用いた計算結果に基づいて、地盤変動に伴う水面変動の応答特性の考察を行う。

4. 地盤変動に伴う津波発生過程の物理特性

(1) 隆起速度 v_B と初期波形の関係

図-4は、水深 $h=4,000\text{m}$ における地盤隆起高 $h_B=1.2, 2.4$ および 3.0m のときの水面波形を隆起速度 $v_B=0.03, 0.06, 0.15$ および 0.3m/s について比較したものである。 $h_B=1.2\text{m}$ の隆起高のときには、隆起速度 v_B に関わらず概ね同様な水面波形を形成しているが、 $h_B=2.4\text{m}$ になると、隆起速度の最も小さい $v_B=0.03\text{m/s}$ のみが水平方向に拡散した水面波形となり、隆起終了時の $h_B=3.0\text{m}$ では、その傾向がより顕著になることがわかる。このときの海底地盤の隆起中心 ($x=90\text{km}$) から右側の隆起範囲 ($90\text{km} \leq x \leq 105\text{km}$) 以降における $z=0\text{m}$ から $-1,000\text{m}$ までの流速ベクトルを $v_B=0.03\text{m/s}$ および 0.3m/s について示したものが図-5である。 $v_B=0.03\text{m/s}$ の場合、流速の値は $v_B=0.3\text{m/s}$ の値に比べて小さいが、その方向は地盤の隆起が進行するに連れて水平方向に卓越するようになる。一方、 $v_B=0.3\text{m/s}$ の場合、隆起開始から隆起終了時 ($t=10$ 秒) まで常に鉛直方向の流速が卓越していることがわかる。つまり、同じ $h_B=3.0\text{m}$ の隆起高であっても、隆起速度が水面波形の変化過程に強く影響を及ぼすものと推察される。特に、一定の隆起高に達するまでに長い隆起時間を要する海底地盤変動の場合、内部流速

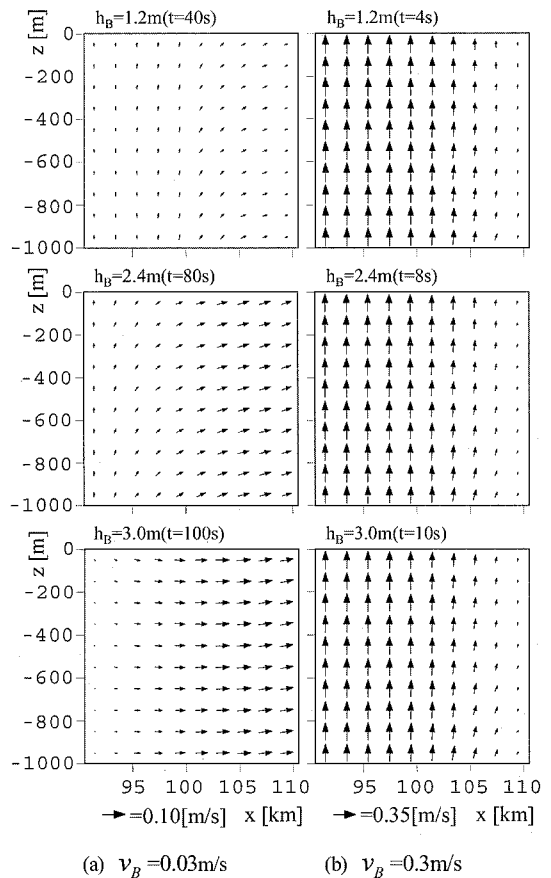
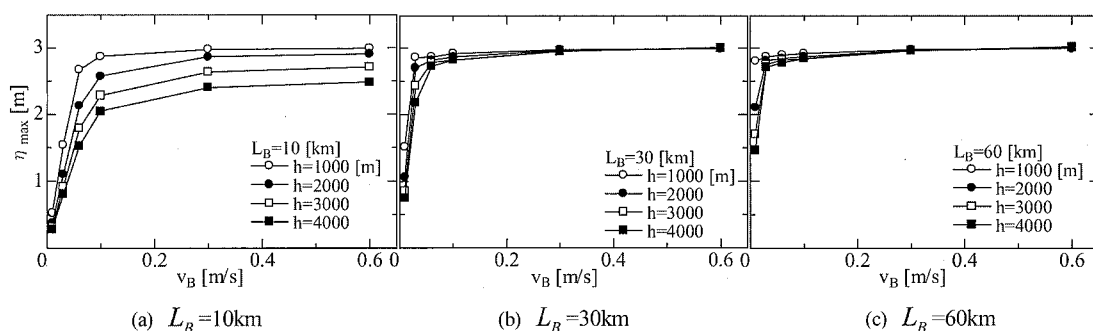
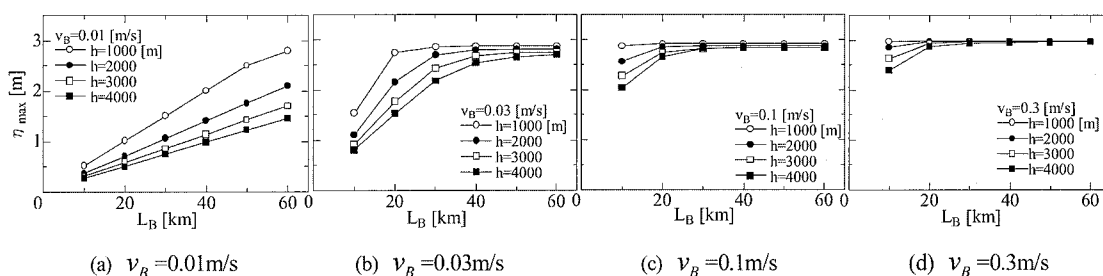
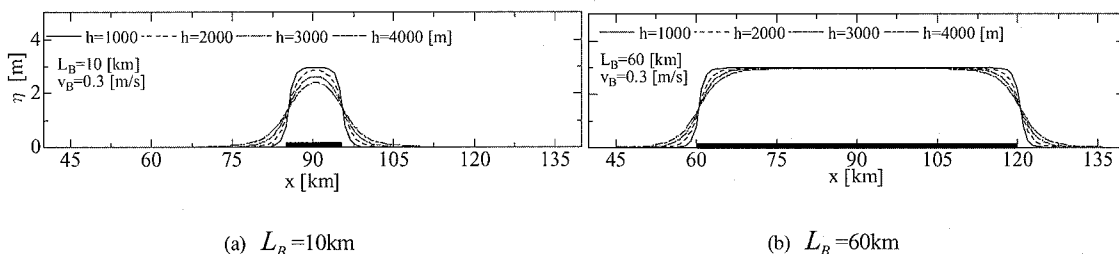


図-5 $z=0\text{m}$ から $z=-1,000\text{m}$ までの流速分布の比較

が水平方向に発達するため、地盤の上昇に伴う水塊の輸送は鉛直方向よりも、水平方向に卓越するようになると考えられる。

(2) 隆起距離 L_B と初期波形の関係

図-6は、隆起距離 $L_B=10, 30$ および 60km について、各水深 $h (=1,000 \sim 4,000\text{m})$ での隆起速度 v_B と最大水面変位 $\eta_{\max}$ の関係を示す。隆起距離の短い $L_B=10\text{km}$ の場合、 v_B が增大するに連れて、 $\eta_{\max}$ は水深の影響を受けるようになり、水深が浅いほど最終隆起高

図-6 水深 $h=1,000\text{m}\sim 4,000\text{m}$ における隆起速度 v_B と最大水面変位 $\eta_{\max}$ の関係図-7 水深 $h=1,000\text{m}\sim 4,000\text{m}$ における隆起距離 L_B と最大水面変位 $\eta_{\max}$ の関係図-8 隆起速度 $v_B=0.3\text{m/s}$ での異なる隆起距離 $L_B=10\text{km}$ および 60km における水面波形の比較

($h_B=3\text{m}$)に近づくようになる。一方、隆起距離 $L_B=30\text{km}$ および 60km の場合、 $\eta_{\max}$ は v_B が小さいときには水深の影響を受けるが、 v_B が 0.1m/s 程度を超えると水深および隆起速度に依らず、最終隆起高と同程度の変位量に達することがわかる。

図-7は、各水深 h における隆起距離 L_B と最大水面変位 $\eta_{\max}$ の関係を示したものである。 $v_B=0.01\text{m/s}$ の場合、 $\eta_{\max}$ は L_B の増大とともに単調に比例増加する。しかし、その値は水深の影響を強く受け、 $h=4,000\text{m}$ の $L_B=60\text{km}$ では、最終隆起高の5割程度の変位にしか達していないことがわかる。 $v_B=0.03\text{m/s}$ の場合、 L_B が増大するに連れて、水深による $\eta_{\max}$ の差異は減少し、最終隆起高に収束するようになる。 $v_B=0.1\text{m/s}$ および 0.3m/s の場合、 $L_B=10\text{km}$ では、 $\eta_{\max}$ は水深の影響を受けるが、 $L_B=20\text{km}$ になるとその差異はほとんど

ど見られなくなる。さらに、 $L_B=30\text{km}$ を超えるようになると、水深に関わらず一定の変位量となり、最終隆起高($h_B=3\text{m}$)に相当する変位となる。したがって、水面の最大変位の推定には、水深および地盤の隆起速度の関係だけでなく、隆起する範囲も考慮が必要であると推察される。

図-8は、 $v_B=0.3\text{m/s}$ での異なる隆起距離 $L_B=10\text{km}$ および 60km について、最大水面波形を比較したものである。同じ隆起速度であっても、初期波形は隆起距離によって大きく異なっている。 $L_B=10\text{km}$ の場合、水深が深くなるほどその波形は水平方向に拡散するようになる。一方、 $L_B=60\text{km}$ の場合、水深に依らず最終隆起高に相当する高さまで上昇する。また、隆起距離 L_B の範囲に相当する水面が上昇し、その距離が長いほど押し上げられる水塊量も多くなると言える。そこで、

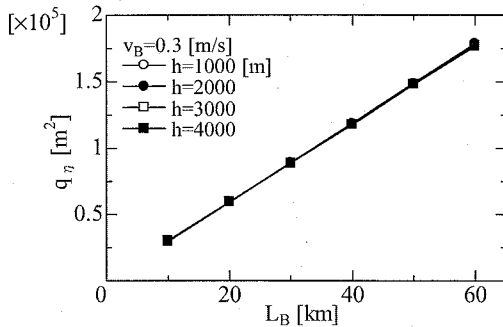


図-9 隆起速度 $v_B=0.3\text{m/s}$ における隆起距離 L_B と単位幅当たりの水塊量 q_η の関係

静水面より上方の変位 $\eta(x)$ から、単位幅当たりの水塊量 q_η を次式より求める。

$$q_\eta = \int_{-L/2}^{L/2} \eta(x) dx \quad (7)$$

ここで、 L は波長である。その結果が図-9 であり、隆起速度 $v_B=0.3\text{m/s}$ での隆起距離 L_B と単位幅当たりの水塊量 q_η の関係を示す。 q_η の値は水深に依らず L_B が増加するに連れて単調増加する。 $L_B=60\text{km}$ での q_η は、 $L_B=10\text{km}$ のそれに比べて約 6 倍の規模になることがわかる。つまり、地盤変動の隆起範囲が海水面の上昇に強く寄与しており、津波の発生規模を支配する因子と考えられる。

(3) 流体内部の運動エネルギー

上述したように津波の規模に隆起範囲が関わることを明示して来たが、ここでは、数値計算によって算出された流速 (u , w) を用いて、水面下における単位面積当たりの運動エネルギー E_k と水深および隆起距離との関係を検討する。その運動エネルギー E_k は、次式を仮定して求める。

$$E_k = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \int_{-h}^0 \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) dz \right\} dx \quad (8)$$

ただし、 $\eta \approx 0$ とする。図-10 は、上式で求めた隆起速度 $v_B=0.3\text{m/s}$ における運動エネルギー E_k と隆起距離 L_B の関係を示したものである。 L_B の増加に伴って、 E_k の値は単調増加しながら水深の影響を受けるようになる。 E_k の算出には、水深の値が支配的になると考えられるが、同水深条件の場合、何れも隆起距離が運動エネルギーに少なからず寄与するものと推察される。

5. おわりに

地盤変動に伴う津波発生過程の物理特性について、

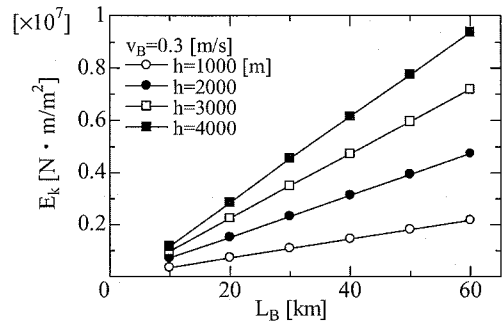


図-10 隆起速度 $v_B=0.3\text{m/s}$ における隆起距離 L_B と運動エネルギー E_k の関係

BEM および空隙率を考慮した VOF 法による 2 種類の計算手法を用いて検討を行った。以下に本研究の主要な結論を述べる。

- (1) 津波発生過程において非回転や非粘性の有無による影響は、縦横比 1/200 の格子サイズでは、水面波形に明確な差異を及ぼさないことが明らかとなった。
- (2) 最終隆起高までに要する隆起時間が長くなるほど、水面波形は水平方向に拡散し、その方向の流速が卓越することがわかった。
- (3) 津波初期波形の最大水位の推定には、水深と隆起速度の関係だけでなく、隆起範囲も考慮する必要があると推察される。
- (4) 地盤変動の隆起範囲が海水面を上昇させる水塊量の増大に強く寄与し、津波の発生規模を支配する重要な因子と考えられる。

参考文献

- 相田勇 (1974) : 地震の断層モデルによる津波の数値実験, 地震, 第 2 輯, pp. 141-154.
- 泉宮尊司, 吉田慶太 (2002) : アジョイントモデルによる津波の波源域の逆推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 291-295.
- 柿沼太郎, 秋山実 (2005) : 海底地形の変動に伴う津波発生過程の数値計算, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 236-240.
- 藤間功司 (2003) : 数値波動水路 (CADMAS-SURF) の開発方針と理論, 第 39 回夏季研修会講義集 B コース, pp. B-3-1-16.
- 松田博文, 陸田秀実, 板野誠司, 安田孝志, 多田彰秀, 福本正 (1998) : 突入ジェットと気泡混入を伴う碎波後の内部特性の関係, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 116-120.
- 松山昌史, 池野正明 (1995) : 海底地盤変動による水面応答特性に関する実験と数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 226-230.
- 劉曉東, 堺茂樹 (2000) : 任意波浪場に於ける大型浮体の弾性応答に関する時間領域解析, 土木学会論文集, No. 656/ II -52, pp. 157-166.