

一様水深下における海底地殻変動に伴う津波の伝播特性の数値解析

Characteristics of Propagation of Tsunami Caused by Seabed Deformation in Uniform Depth

小笠原敏記¹・堺 茂樹²

Toshinori OGASAWARA, Shigeki SAKAI

The purpose of this paper was to make clear relationships between tsunami generating and its propagating and a seabed deformation. In particular, we have studied how the deformation velocity and the deformation width affect the process of tsunami propagation. For the purpose of our work, numerical simulations of tsunami generated by the seabed deformation were carried out in three kinds of seabed deformations. As a result, when the width of seabed deformation became to more than 100 km, tsunami heights decayed to about 40 % than its tsunami maximum heights. Further, it was found that the decay rate of tsunami height of negative waves is lower than that of positive waves. Moreover, the negative wave propagated with the wave height almost equal to the maximum tsunami height.

1. はじめに

日本は災害の多発国であるが、島国であることから海岸平野部に多くの人々が集中している。そのため、高潮と共に津波は重要な災害と位置づけられている。津波災害は、気象災害に比べて発生する頻度が少ないものの、一度発生すれば大災害を引き起こす可能性がある。また、その発生した季節、時間、地震の性質、海岸地形などに大きく左右される災害と言える。

津波の発生源は、地震の断層運動の破壊速度に起因した海底の地殻変動に依るものが多く、この地殻変動を断層モデルの初期条件として与えることによって、海底地盤の永久変位を津波の初期水位と仮定した津波の発生・伝播のシミュレーションが行われている (Mansinha・Smylie, 1971; Aida, 1978)。しかしながら、津波は時間に依存する過程を経て生成するため、海底が比較的緩慢に変動する場合、津波が生成すると同時に伝播し、変動後の海底地形と異なる水面形が生成されと考えられる。1896 年の明治三陸地震のような地震エネルギーが大きいにも関わらず、津波エネルギーが非常に大きくなる津波地震の場合、地殻変動を時間発展的に直接計算して、津波の発生・伝播と地殻変動の関係付けをより明確に表すことも必要と考えられる (河田ら, 2006)。また、著者ら (2006) はこれまでに隆起する地殻変動の隆起速度や隆起幅と津波の初期波形との関係を数値解析より検討して来た。

そこで本研究では、海底の震源地が浅く、断層運動が地殻変動にほぼ等しいと仮定して、隆起あるいは沈降する地殻変動を時間発展的に直接数値解析することによ

って発生させた津波について、その地殻変動の速度や規模と一様水深下の津波伝播特性との関係を明確にする。さらに、隆起と沈降が同時に起きるような地殻変動によって発生する津波の伝播特性についても同様な検討を行う。

2. 数値計算手法の概要

海底の地殻変動によって発生される津波に対する数値計算手法には、劉・堺 (2000) によって開発された要素近似による境界要素法を用いる。基礎式の連続の式は、完全流体および渦なし運動であると仮定すれば、速度ポテンシャル ϕ に関するラプラス方程式となり、グリーンの定理をその式に適用することによって、次式の境界積分方程式として表される。

$$\alpha \cdot \phi + \int_s \left[\phi \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{\partial \phi}{\partial n} G \right] ds = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 G は基本解、 α は各境界点の形状で決まる係数、 $\mathbf{n}$ および $\mathbf{s}$ は各境界面における法線および接線方向の単位ベクトルを表す。本解析では、微小振幅波を対象としており、次式に示す境界条件を適用した。

運動学的条件：

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_b$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -V_B \quad \text{on } S_{source} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{on } S_f$$

力学的条件：

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} - g\eta = 0 \quad \text{on } S_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

計算領域の両端を開境界とするため、次式の Sommerfeld 型放射条件を適用した。

1 正会員 博(工) 岩手大学助教工学部建設環境工学科

2 正会員 工博 岩手大学教授工学部建設環境工学科

表-1 計算条件

水平方向節点間隔: Δx [m]	1,000
鉛直方向節点間隔: Δz [m]	50
時間間隔: Δt [s]	0.5
水深: h [m]	4,000
地殻変動高: H_B [m]	3
地殻変動速度: V_B [m/s]	$\pm 0.01, \pm 0.03, \pm 0.05, \pm 0.1, \pm 0.2, \pm 0.3$
地殻変動幅: W_B [m]	20, 40, 60, 80, 100

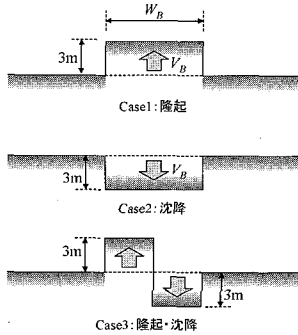


図-1 地殻変動の種類

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{1}{\sqrt{gh}} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{on } S_{\text{open}} \quad (4)$$

ここで、 S_b , S_{source} , S_f および S_{open} はそれぞれ底面、地殻変動、自由水面および開境界、 V_B は地殻変動速度であり、 h は水深を表す。そして、式(1)を空間的に離散化した方程式に運動学的・力学的境界条件を満足させて解くことにより、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。なお、時間の離散化には Newmark- β 法を用いた。

その解析領域には、水平方向に 600 km、鉛直方向に 4 km の鉛直断面二次元場の数値水槽を設定した。各方向の節点間隔を $\Delta x=1000$ m, $\Delta z=50$ m とした。底面中央部の節点を時間間隔 $\Delta t=0.5$ 秒毎に変位させて地殻変動と見なした。その変動の隆起または沈降の最大変位を 3 m とし、その速度 V_B を 0.01 m/s から 0.3 m/s までの範囲で変化させた。また、明治三陸津波の波源域の幅が 50 km ~ 70 km と推定されることから(渡辺, 1998)、地殻変動幅 W_B を 20 km から 100 km の範囲に設定した。地殻変動の種類には、単純な隆起 (Case1) または沈降 (Case2) のみ、隆起と沈降が同時に生じる場合 (Case3) の 3 種類を設定した(図-1)。なお、隆起と沈降が同時に発生する場合には、底面中央 ($x=300$ km 地点) から左側を隆起、右側を沈降させた。これらの計算条件を表-1 に示す。

本数値解析では、並列計算機 (Silent-SCC Saya32, CPU; Dual Core 3.4 GHz*6, メモリ; 4 GHz) を用いた。

3. 海底地殻変動に伴う津波伝播特性

海底の地殻変動が単純に隆起する場合と沈降する場合によって発生する津波の伝播特性の比較検討を行う。次に、単純な地殻変動によって発生する津波について、地殻の変動速度あるいは変動幅と津波の伝播特性を明らかにする。さらに、隆起と沈降が同時に起きた場合についても同様な検討を行う。

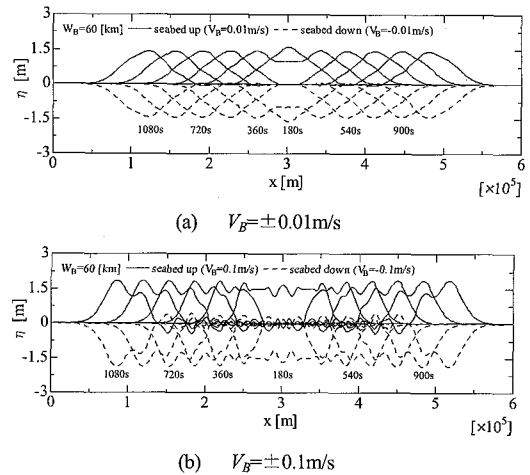
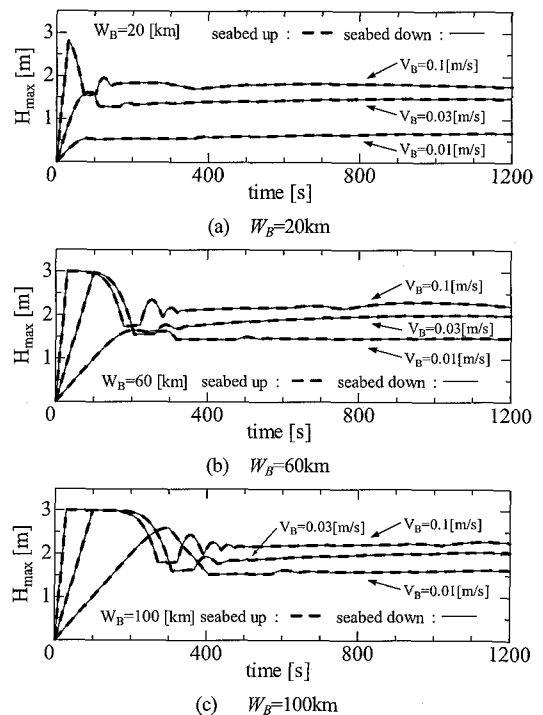


図-2 地殻変動の隆起する場合 (実線) と沈降する場合 (破線) の空間波形の比較

図-3 津波最大波高 H_{max} の時間的変化

(1) 隆起の場合と沈降の場合の比較

図-2は、隆起する場合 (Case1) と沈降する場合 (Case2) で発生した津波の空間波形を 180 秒間隔で示したものである。なお、上段が $V_B = \pm 0.01$ m/s, 下段が $V_B = \pm 0.1$ m/s の変動速度, 地殻の変動幅 W_B が 60 km であり, 実線が隆起, 破線が沈降の空間波形を示す。時刻 $t=180$ 秒から $t=1080$ 秒まで, 静水面を基準に上下対象な空間波形で伝播することがわかる。そこで, 津波最大波高 (全振幅) $H_{\max}$ の時間的変化を比較する。図-3はその結果であり, 地殻変動幅 W_B を 20, 60 および 100 km の場合での各変動速度 V_B について比較したものである。地殻変動幅が異なる場合やその変動速度が異なる場合でも, 最大波高に違いは見られない。

つまり, 地殻変動が単純に隆起する場合や沈降の場合には, 津波発生時の海面が隆起するか沈下するかの違いであり, 伝播する津波の形状は海面を基準に全く上下対象となる。さらに, 地殻の変動高さが同じであれば, 一様な隆起あるいは沈降する場合, 津波の最大波高は一致することから, 海岸に襲来する津波は, 波高のみで考えれば同様な危険度になることが推察される。

(2) 一様な地殻変動での津波伝播特性

ここでは, 隆起および沈降による津波の伝播特性に違いが見られない上述の結果を踏まえ, 海底の地殻変動が一様に隆起する場合についてのみ詳細な検討を行う。

図-4は, 津波最大高さ $\eta_{\max}$ の発生時間を隆起速度 V_B とその幅 W_B について比較したものである。なお, $V_B = 0.01$ m/s かつ $W_B = 20$ km の場合, 隆起終了後も変位が徐々に増大し, 約 22 分後に最大高さ (=0.6 m) に到達したため, この図より省いた。隆起速度が 0.2 m/s より大きくなれば, 隆起幅に依らず隆起高さに相当する津波高さになる。また, 隆起幅が増大すれば, 隆起速度が遅い場合でも, 最大の津波高さは隆起高に近づく傾向を示す。

図-5は, 隆起幅 $W_B = 20, 60$ および 100 km での津波高さ η_t の時間変化を各隆起速度 V_B について比較し

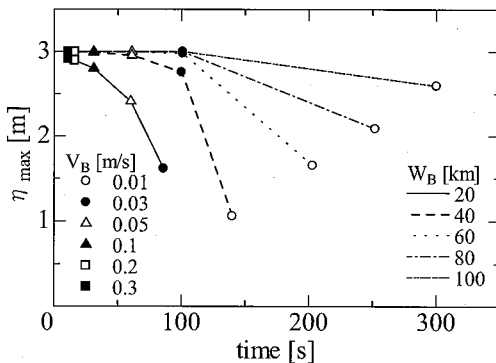


図-4 地殻変動 (隆起) 速度 V_B およびその幅 W_B における津波最大高さ $\eta_{\max}$ の発生時間の比較

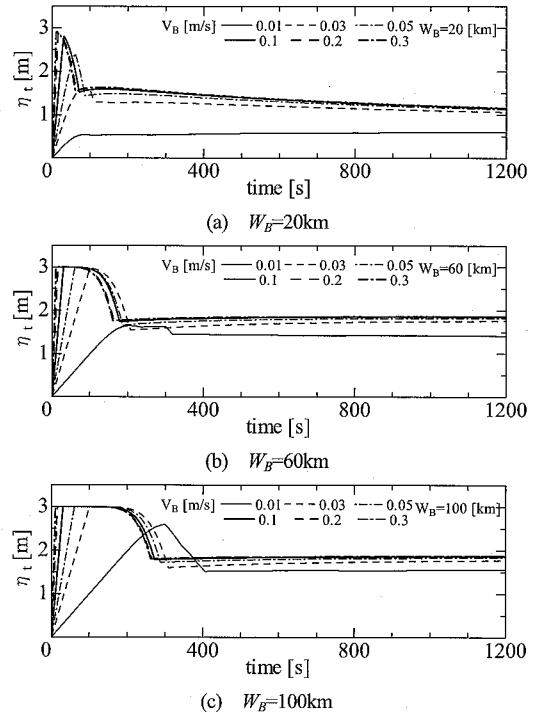


図-5 各隆起速度 V_B における津波高さ η_t の時間変化

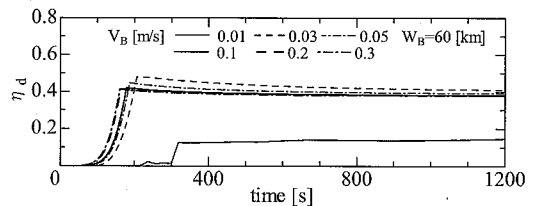


図-6 各隆起速度 V_B での津波最大高さ $\eta_{\max}$ に対する津波高の減衰率 η_d の時間変化

たものである。図-4に示したように隆起速度によって津波最大高さに到達するまでの時間的な差が生じるものの, 隆起幅が増大すれば, いずれの場合も最大高さに到達後, その津波は減衰し, ある程度減衰した後, 一定の高さを保った状態で伝播していることがわかる。そこで, 津波最大高さ $\eta_{\max}$ に対する各時刻での津波高さの減衰率 $\eta_d = (\eta_{\max} - \eta_t) / \eta_{\max}$ を検討する。

図-6はその結果であり, $W_B = 60$ km における減衰率 η_d の時間変化を示す。津波最大高さを 100 秒程度保った後, 1 割から 4 割の範囲で減衰した状態を維持しながら伝播するようになる。さらに, 隆起運動の開始から 900 秒後の減衰率 η_d と隆起幅 W_B との関係を図-7に示す。隆起幅が小さく, かつその速度が速くなると, 減衰率が高くなる傾向を示すが, 隆起幅が増大すれば, 減衰率は一定の値を示すようになる。特に, 隆起幅が 100 km になると, 隆起速度に関わらず約 4 割の減衰率となることがわかる。

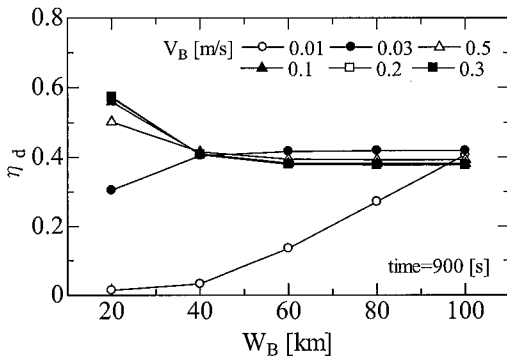


図-7 各隆起速度 V_B における津波高の減衰率 η_d と隆起幅 W_B との関係 (隆起開始から 900 秒後)

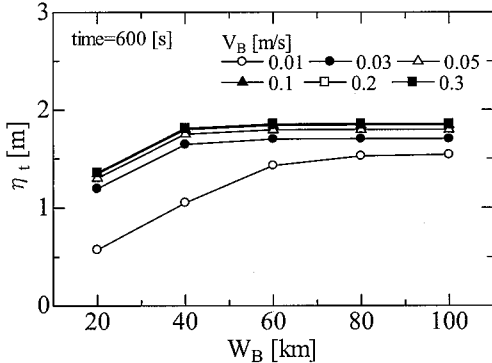
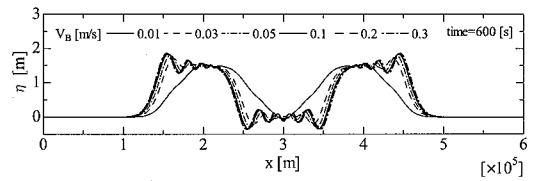


図-8 各隆起速度 V_B における津波高さ η_t と隆起幅 W_B との関係 (隆起開始から 600 秒後)

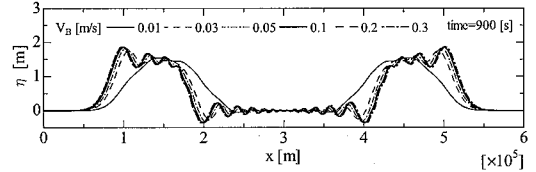
次に、図-8 は、隆起運動の開始から 600 秒後の津波高さ η_t と隆起幅 W_B との関係を示す。 $V_B=0.03$ m/s を越えるような隆起速度になると、津波高さは概ね一致するようになり、 W_B が 40 km 以上になれば、隆起幅に依らず一様な値を示すようになる。また、 $V_B=0.01$ m/s のような遅い地殻変動の場合でさえも、 W_B の増大に伴って津波高さも増加し、他の隆起条件の場合と同様な津波高さに漸近するようになることがわかる。

図-9 は、100 km の幅の地殻が隆起し始めてから 600 秒後および 900 秒後の空間波形を各隆起速度 V_B について比較したものである。隆起速度の最も遅い 0.01 m/s では、孤立波に似た波形で伝播する。それ以外の隆起速度では、波形の状態に大きな差異は見られない。加えて、地殻変動に相当する範囲の海面の振動によって引き起こされたと推測される複数の波が、津波第 1 波の後方を連続して伝播することがわかる。

以上より、断層(地殻変動)の幅が 100 km 以上になれば、遅い隆起速度(0.01 m/s)でさえも、地殻変動の変位量に相当する津波が発生し得るものと予想される。さらに、津波の高さも隆起速度に依らず、最大高さの約 4 割の減衰した状態で伝播する。ゆえに、明治三陸津波のような低周波地震の場合、断層運動のズレの変位量とこ



(a) 隆起開始から 600 秒後



(b) 隆起開始から 900 秒後

図-9 各隆起速度 V_B における津波高さ η_t の空間波形

のときの断層の幅が津波の高さを決定付ける重要な因子と考察される。さらに、津波の第 2 波・第 3 波の発生原因には、隆起速度が遅い場合、海底形状や海岸地形の影響が主要な因子となり、隆起速度が速い場合、これらに加えて、海面の振動も影響すると考えられる。

(3) 隆起と沈降が同時に引き起こされる場合:

Case3

海底の地殻変動の隆起と沈降が同時に生じることによって発生する津波の空間波形を 120 秒間隔で示したものが図-10 である。このときの全地殻変動幅は 60 km であり、波源中央 ($x=300$ km 地点) からそれぞれ 30 km の幅の隆起および沈降の変動速度は 0.1 m/s および

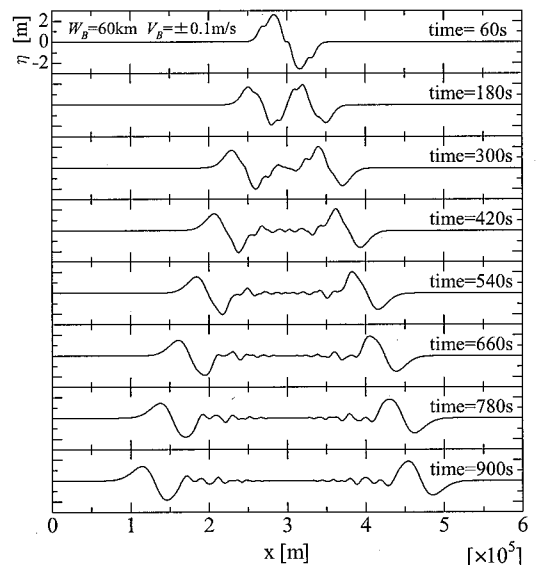


図-10 隆起と沈降によって発生する津波の空間波形の時系列変化 (隆起幅: 底面中央左側 30 km, 沈降: 同右側 30 km)

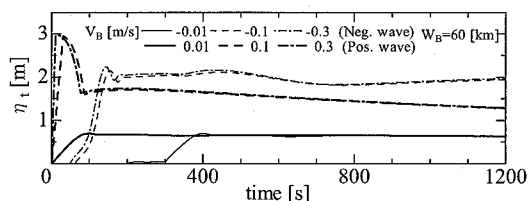


図-11 各地殻変動速度 V_B における引き波および押し波の津波高さ η_t の時間変化

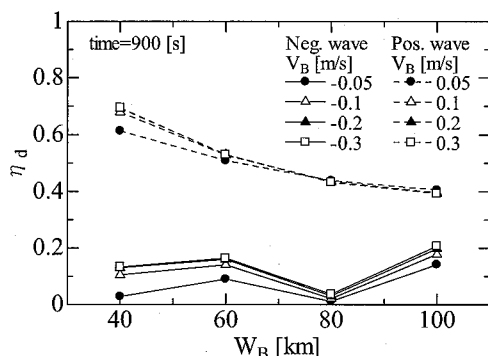


図-12 引き波および押し波の津波高さの減衰率 η_d と地殻変動幅 W_B との関係 (変動開始から 900 秒後)

-0.1 m/s である。このような地殻変動の場合、波源中央の水面を基点に波形が点対象となる。また、隆起する側では押し波、沈降する側では引き波から第 1 波が発生する。また、その背後を複数の波が波峰間相互作用の影響を受けながら、第 2 波・第 3 波が伝播しているものと推察される。

図-11 は、図-10 と同条件下における引き波および押し波の津波高さ η_t の時間変化を示す。 $V_B = \pm 0.01$ m/s と地殻変動が遅い場合、引き波と押し波の η_t は最大高さに到達するまでに時間的差が生じるけれども、それ以降では、ほとんど同じ変位で伝播する。しかし、その変動速度が速くなると、引き波に比べて押し波の η_t が小さくなる。そこで、地殻変動開始から 900 秒が経過したときの津波について、(5) 式より求めた津波高さの減衰率 η_d と地殻変動幅 W_B との関係を各地殻変動速度 V_B で比較したものを図-12 に示す。引き波より押し波の η_d の値が、 W_B の規模に依らず大きくなるのがわかる。さらに、引き波の場合、津波高さの減衰率は 2 割より小さいが、押し波の場合、その減衰率は 5 割～7 割程度となる。

次に、図-13 は、津波高さ η_t と地殻変動幅 W_B との関係を各変動速度 V_B について比較したものである。引き波の場合、 W_B が 80 km (沈降幅 = 40 km) 以上になれば、一様な値に収束するようになる。一方、押し波の場合、 W_B の増大に伴って η_t の値も大きくなるが、その増加率は徐々に小さくなる。ゆえに、 W_B の規模がさ

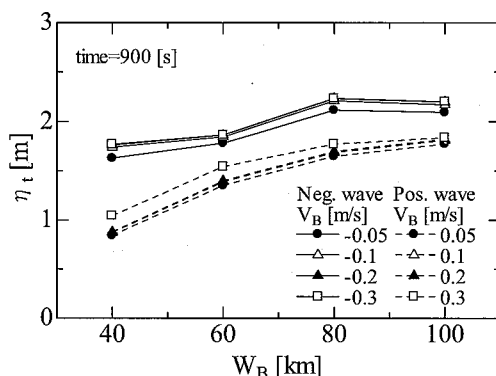


図-13 引き波および押し波の津波高さ η_t と地殻変動幅 W_B との関係 (変動開始から 900 秒後)

らに大きくなれば、 η_t の値も収束するものと推測できる。また、この結果は、図-7 に示した一様な隆起のみの結果と同様な傾向を示していることがわかる。

以上の結果、地殻変動の隆起と沈降が同時に生じることによって押し波と引き波が発生し、押し波よりも引き波の津波高さの減衰率が低く、津波の最大高さに近い高さで伝播する。ゆえに、地殻変動が沈降する側に面する海岸では、隆起側よりも危険度が増す可能性があり得ると考察される。

4. ま と め

本研究の主要な結論を以下に述べる。

- (1) 地殻変動が隆起または沈降のみの場合、両者の津波の最大波高は一致することが明らかとなった。
- (2) 地殻変動の幅が 100 km 以上になれば、遅い変動速度でも、その変動の変位量に相当する津波が発生し、4 割程度の減衰を維持して伝播することがわかった。
- (3) 押し波よりも引き波の方が津波高さの減衰率が低く、ほぼ津波最大高さで伝播することが明確となった。

参 考 文 献

- 小笠原敏記・若松明史・児玉 烈・堺 茂樹(2006): 海底地震の地盤変動に伴う津波発生過程の物理特性, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 36-40.
- 河田恵昭・奥村与志弘・越村俊一(2006): 津波の発生に及ぼす断層破壊の動的特性の影響, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 291-295.
- 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, pp. 157-166.
- 渡辺偉夫(1998): 日本被害津波総覧[第 2 版], 100p.
- Aida, I.(1978): Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, J. Phys. Earth, Vol. 26, pp. 57-73.
- Mansinha, L and D. Smylie(1971): The displacement fields of inclined faults, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 61, pp. 1433-1440.