

海中音波を用いた津波観測の津波警報システムへの応用に関する研究

東京大学 学生会員 ○花谷 仁志
 東京大学 正会員 沼田 宗純
 東京大学 正会員 目黒 公郎
 東北大学 正会員 越村 俊一

1. はじめに

海底地震の発生後、海中を伝わる音波(T-phase)がしばしば水圧計やハイドロフォン等で観測されることが知られている。T-phaseとは、地震の発生による海底面の急激な変動等を起因として海中を伝わる粗密波のことである。T-phaseは海中を音速(約1500m/s)で伝播し、津波(長波)の伝播速度に比べ10倍以上速いので、沖合津波観測施設に頼らずとも浅海部に安価な水圧計等を設置することで、T-phaseを観測できれば津波の早期検知が可能になる。これまで、T-phaseの観測事例は数多くあったが、地震の発生機構やその規模とT-phase波形の特徴との関連性は十分に検討されておらず、津波の警報システムに組み込むことができない状況であった。そこで本研究では、T-phaseを沿岸部の観測点で計測して津波の早期検知に利用することを目標とし、T-phaseの周波数特性や振幅についての特徴を理論的に解析するとともに、地震の発生規模や海底地形、観測点の岸沖距離との関係について検討した。

2. 水深の変化を考慮したT-phase評価式

既存のT-phaseの評価式として、一様水深における任意の観測点でのT-phase波形の理論解が岩崎(1992)によって提案されている。本研究では岩崎による式を変形し、海底が一様に傾斜する地形モデルにおいてもT-phase波形を導出できるようにした。導出した式を以下に示す。

$$\eta_a(x, t) = \text{sgn}(x - a)\eta_r(|x - a|, t) + \text{sgn}(x + a)\eta_r(|x + a|, t) + \text{sgn}(x - a)\eta_r(|x - a|, t - \tau) + \text{sgn}(x + a)\eta_r(|x + a|, t - \tau)$$

$$\eta_r(X, t) = -\frac{2V_0}{\pi} \exp(\gamma \cdot h) \cdot \sum_{n=0}^{(\pi-\alpha)/2\alpha} (-1)^n \cdot H\left(t - \frac{R_n}{c}\right) \left\{ t \cdot \tan^{-1}\left(\frac{h_n(c^2t^2 - R_n^2)^{1/2}}{X \cdot c \cdot t}\right) - \frac{h_n}{c} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{(c^2t^2 - R_n^2)^{1/2}}{X}\right) \right\}$$

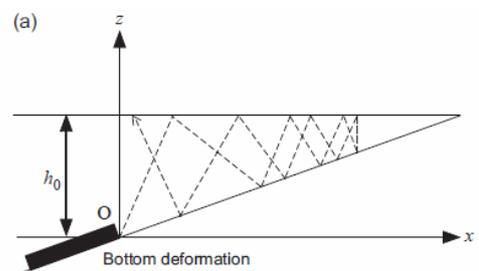
$$R_n^2 = \{d - (d - x) \cdot \cos(2n\alpha)\}^2 + \{d \cdot \tan\alpha + (d - x) \cdot \sin(2n\alpha)\}^2$$

$$h_n = h + 2d \cdot \sum_{m=1}^n \frac{\sin\alpha \cdot \sin\beta}{\cos\alpha \cdot \sin(\pi - 2m\alpha - \beta)}$$

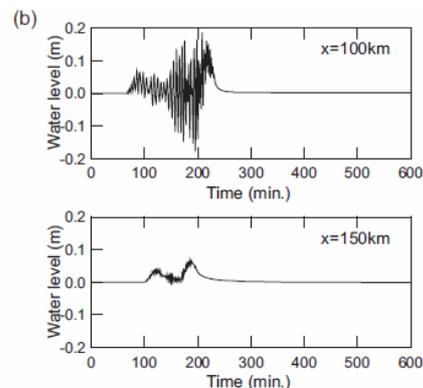
$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{d \cdot \tan\alpha + (d - x) \cdot \sin(2n\alpha)}{d - (d - x) \cdot \cos(2n\alpha)}\right) - \alpha$$

ここで、 η は粗密波だけによる自由表面での水位変動、 V_0 は地盤上昇速度、 $\gamma = g/2c^2$ 、 g は重力加速度、 c は海中音速、 τ は地盤上昇時間、 h は水深、 n は底面での反射回数、 $2a$ は上昇地盤の長さ、 x は変動地盤の中心から観測点の距離、 α は海底の傾斜角度である。

上の理論解を用いて、図-1(a)のモデルにおいて観測されるT-phase波形を導出した。図-1(b)にT-phase波形の計算例を示す。沖合の観測点では継続的な短周期のT-phaseが観測されるのに対し、沿岸に近い観測点では短周期のT-phaseは減衰し、スパイク状の長周期のT-phaseが観測されることがわかる。



(a)T-phase 理論解導出の座標系



(b)T-phase 理論波形の計算例(水位に換算)

図-1 水深の変化を考慮したT-phaseの評価

キーワード T波、津波、海中音波、津波警報システム

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所 Be-604

2003年十勝沖地震ではナウファスの十勝港沖観測点で T-phase とみられる波形が観測されたことが、永井ら(2004)によって報告されている。ここでは水圧計に約 30 秒間スパイク状の波形が観測されており、沿岸に近い観測点で観測される長周期の T-phase と言える。

3. T-phase 理論解と津波の関係

観測された T-phase による津波規模の推定の可能性を考察する。T-phase と津波が震源パラメータの変化に対応する特徴を示すとすると、T-phase から津波の推定ができる可能性がある。ここでは、震源モデルとして、一定時間一様に地盤が上昇するモデルを考え、震源パラメータとして地盤上昇時間、地盤上昇速度、上昇地盤の長さの 3 つを考慮した。

またここでは震源位置が既知の場合を考え、3 つの震源パラメータを変化させることによって、沖合で観測される短周期の T-phase、沿岸近くで観測される長周期の T-phase、津波の 3 つの波形がどのように変化するかを評価した。震源パラメータと津波の関係については Kajiura(1970)の式を用いた。表-1 から表-3 は震源パラメータとそれぞれの関係をまとめたものである。

表-1 震源パラメータと短周期 T-phase の関係

	上昇速度	上昇時間	変動幅
最大振幅	比例	一定	単調増加
周期	一定	一定	一定
初動傾き	比例	一定	一定

表-2 震源パラメータと長周期 T-phase の関係

	上昇速度	上昇時間	変動幅
最大振幅	比例	単調増加	単調増加
周期	一定	単調増加	一定
初動傾き	比例	一定	一定
波形時間積分	比例	比例	比例

表-3 震源パラメータと津波の関係

	上昇速度	上昇時間	変動幅
最大振幅	比例	単調増加	一定
周期	一定	単調増加	単調増加
波形時間積分	比例	比例	比例

まず短周期の T-phase に関しては、震源パラメータの変化に対して不規則な変化が多く、最大振幅と周期のみに特徴がみられた。しかし、これらの特徴のみでは短周期 T-phase から震源パラメータや津波を推定することはできない。

次に長周期の T-phase に関しては、表 3 の震源パラメータと津波との関係と多くの共通点があることがわかる。特に波形を時間積分したもの、つまり水位・水圧の総変化量に関しては、長周期の T-phase・津波ともに 3 つすべての震源パラメータに対して比例していることがわかる。津波の水位総変化量は津波の規模を表していると言えるため、観測された T-phase の水圧総変化量を求めることによって津波の規模を推定できると考えられる。また、波形の傾き・振幅・周期の特徴を分析することで 3 つの震源パラメータをすべて一意に決定することができる。

4. T-phase 観測条件の検討

震源位置が既知である時は長周期の T-phase によって津波の規模を推定することが可能であるが、震源位置が既知でない場合は T-phase のみからは推定はできない。そこで、複数の地点での観測により、T-phase 到達時間の差によって震源位置を決定づける必要がある。

また、震源と観測点の距離が遠い場合に T-phase の振幅が小さくなり、観測が困難になることが考えられるが、その場合は観測施設のネットワーク化による情報共有によって対応できる。

5. 本研究の成果と今後の展望

本研究では T-phase 検知による津波警報の実用可能性について検討を行った。本研究の成果として、沿岸に近い観測点では 1 分程度のスパイク状の波形を持った T-phase が観測され、震源位置が既知の場合は観測された長周期の T-phase 波形を分析することによって来襲する津波の規模が推定できることがわかった。

今後の展望としては SOFAR 層などのより複雑な海洋条件の考慮、解析解を用いた T-phase 評価による個別事例への対応、さらに本研究の成果に基づいた T-phase 観測データの収集・検証を行う必要がある。

参考文献

- ・岩崎伸一(1992): 海中音波、気圧波を利用した津波予測技術について、津波工学研究報告第 9 号, p65.
- ・永井紀彦・小川英明(2004): 平成 15 年(2003 年)十勝沖地震津波波形の特性、港湾空港技術研究所資料 No.1070.
- ・Kinjiro Kajiura(1970): Tsunami Source, Energy and the Directivity of Wave Radiation, 東京大学地震研究所彙.