

断層運動に伴う動的地盤変位を考慮した津波解析の評価

大 町 達 夫*・仲 摩 貴 史**

1. はじめに

1993年北海道南西沖地震は複雑な破壊過程を呈しており、本来ひとつであるべき断層モデルが、逆解析に使用する基礎的資料の種類によって大きく異なるという問題を生じている。例えば、地震学的に推定された断層モデルから決まる海底変位では小さすぎ、奥尻島や北海道西岸地区を襲った津波の遡上高さを説明するためにはその変位を約3倍にする必要が生じている(首藤(1993))。こうした問題は、1983年日本海中部地震津波においても言われており、いまだに未解決の問題である。

津波の数値解析に関する既往の研究では、海底地盤の永久変位を津波初期波形として海水面に与え、海水面に関する波動方程式を解いている(以後、静的解析と呼ぶ)。地震時の海底地盤の動的地盤変位が永久変位の数倍に及ぶことや津波初期波形とする永久変位が生ずる範囲より動的地盤変位が生ずる範囲の方がはるかに広いことなどを考慮すると、従来の津波解析手法が実地震時の現象を充分表現しているとは言い難い。

本研究では、断層運動に伴う海底地盤の動的地盤変位を離散化波数法で求め、それを流体部分に入力し津波の伝播性状を調べる(以後、動的解析と呼ぶ)。地盤の応答計算の結果を海底面に直接入力するという点で実現象を忠実に表現しており、本解析手法を用いた津波解析によって、上記の未解決の問題の解明を試みるのが本研究の目的である。

2. 解析手法

解析手法としては、海底地盤及び海を非結合系とモデル化し、まず海底地盤の変位時刻歴を求め、次にそれを流体部分に入力することで津波伝播解析を行う。

動的地盤変位の解析手法は、震源近傍の実体波と表面波を区別なく扱うことが可能であるという点で、離散化波数法を用いる。一般に、津波発生は上下変動の卓越した断層により形成される(渡辺(1985))ことから、本研究では、すべり角90度の逆断層モデルを仮定し、これを

満足する弾性波動方程式の波動ポテンシャルから変位場を表現する。そして離散化波数法を用いて周波数領域解を求め、フーリエ逆変換により海底地盤における変位時刻歴を求める。

流体部分の解析は、海底地盤変位を忠実に入力するため、津波の諸現象を厳密に記述できるように質量保存の式、および運動量保存に関する Navier-Stokes の方程式を用いる。両式における未知変量(u, v, w (流速), p (圧力))は差分法(FDM)を用いて求める。また、津波波高を表す自由表面は時間的・空間的に変化するもので、自由表面を含むメッシュに高さ関数を取り入れて自由表面の変位時刻歴を求める。

3. 動的地盤変位が津波波形に及ぼす影響

海底地盤の動的地盤変位が津波波形、主に波高に及ぼす影響を調べるために二次元津波伝播解析を行った。解析モデル及び諸定数を図-1に示す。なお、図-2~図-4の横軸は図-1の座標軸に示す距離に対応している。

計算結果を図-2に示す。縦軸は、断層破壊開始から5秒毎に100秒までの津波波形を示しており、点線は静的解析、実線は動的解析の結果を表す。動的解析によって、静的解析では現れない短周期の波が発生し、これは伝播速度から海底地盤に生じた Rayleigh 波による海面変動であることが判明した(図中 A)。また、動的解析による長波津波成分は静的解析に比べて、数十秒程到達時刻に遅れが生じる。これは、断層の破壊継続時間と海水が持ち上がるまでに要する時間が遅れとなってあらわれるためである。

動的解析結果から、周期10~20秒程度の Rayleigh 波による短周期成分を除去した長波津波成分の最大振幅と静的解析のそれとの比を図-3に示す。震源近傍、特に破壊進行方向で、比の値が大きくなることが分かる。動的解析が長波津波成分の振幅に及ぼす影響は、地盤と流体の弾性効果に起因する。破壊開始時以降弾性変形する地盤によって、動的解析による海水面は静的解析による海水面を中心とした振動を繰り返すことになる。この際、振幅比が1を上回る地域が現われ、それが断層近傍の最も海底地盤が隆起した部分の上に位置する海水面という

* 正会員 工博 東京工業大学 人間環境システム専攻 教授

** 正会員 工修 日本工営(株)(研究当時 東京工業大学大学院生)

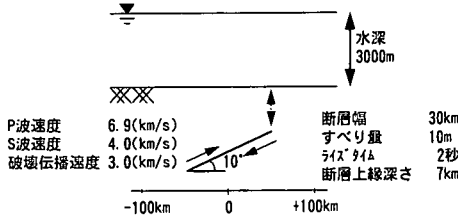


図-1 解析モデル

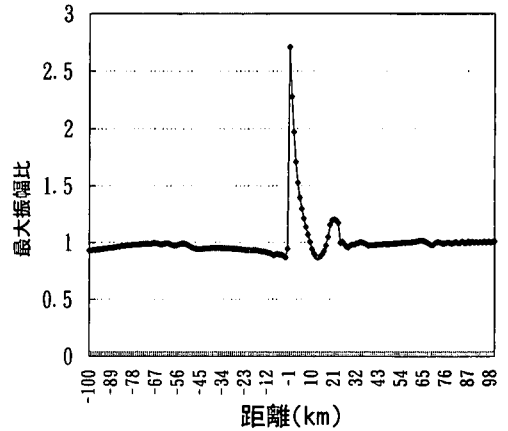


図-3 長波津波成分の最大振幅比

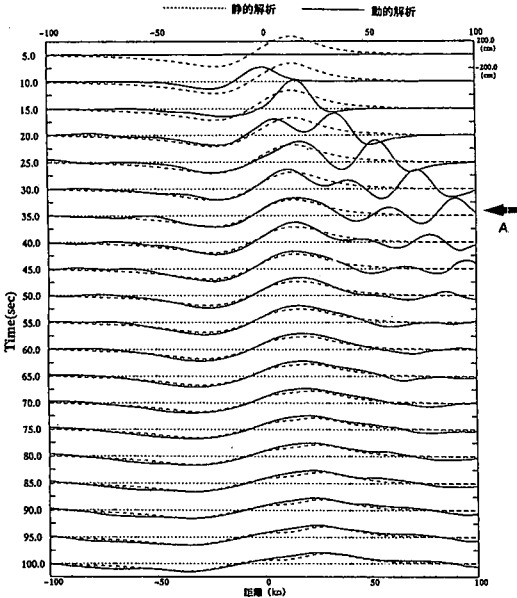


図-2 静的解析と動的解析の比較

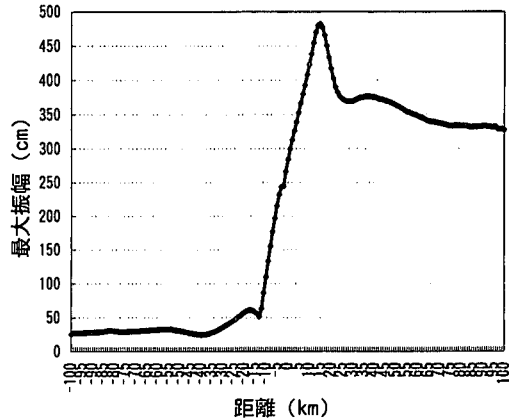


図-4 Rayleigh 波による海面変動の最大振幅

ことになる。

次に、長波津波成分を除去し、Rayleigh 波による海面変動の最大振幅をとったものを図-4 に示す。断層の破壊進行方向において、この海面変動が大きいことが分かる。

4. 1993 年北海道南西沖地震の破壊過程と地殻変動

1993 年北海道南西沖地震の破壊過程は複雑であり、これは余震分布 (日野ら (1994)) を見ても明らかである。余震平面分布より、断層面は奥尻島付近を境に「く」の字に曲がっていることが分かる。また、余震鉛直分布より、断層面の傾斜は西下がりの方が優勢であるものの、東下りの可能性も存在している。そのため、多重震源を仮定した断層モデルが提案されている。表-1 に各種断層モデルを示す。断層の位置及び大きさは図-5～図-7 に示す。これらを比較すると、縦ずれ変位について、モデ

ル 2, 3 はモデル 1 の 2～3 倍に達していることが分かる。また、南断層について、モデル 1, 2 は西下がりの傾斜であるが、モデル 3 は東下がりの傾斜になっている。

次に、これらのモデルを用いて行った地盤の上下変動の計算結果を図-5～図-7 に示す。モデル 1 は、近地強震記録を用いて求めた 2 枚断層 (北断層, 南断層) に、奥尻島の沈降を説明できるように、地震モーメントとしてはあまり大きくない局所断層が加えられたものである。その結果、図-5 のように奥尻島の数 10 cm の沈降を表現できている。また、モデル 2, モデル 3 によっても、奥尻島の沈降をおおよそ説明できていることが分かる。いずれの計算結果においても、奥尻島近海に 100 cm 以上の隆起部が存在し、これが到達時刻が早く、振幅の大きかった津波の原因と考えられる。

また、いずれのモデルを用いた計算においても、地盤の永久変位の数倍に及ぶ動的変位が発生している。これが津波波形に大きな影響を及ぼしている可能性がある。

表一 1993 年北海道南西沖地震断層モデル

	推定使用資料	走向	傾斜角	平均縦ずれ 変位 (m)
モデル 1				
北断層	近地強震記録	200°	30°W	0.75
南断層	奥尻島の地殻変動	160°	30°W	0.62
局所断層		160°	60°W	3.00
モデル 2				
北断層	奥尻島、渡島半島の 地殻変動	195°	20°W	4.00
中断層		170°	30°W	3.94
南断層		130°	55°W	6.13
モデル 3				
北断層	強震記録	193°	30°W	3.94
南断層	津波データ	337°	60°E	8.58

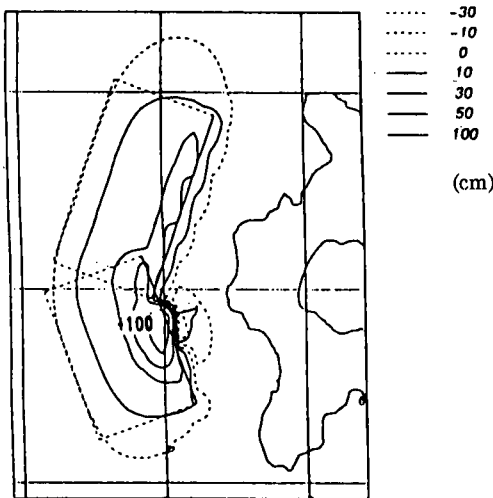


図-5 モデル 1 による地殻の理論上下変動分布

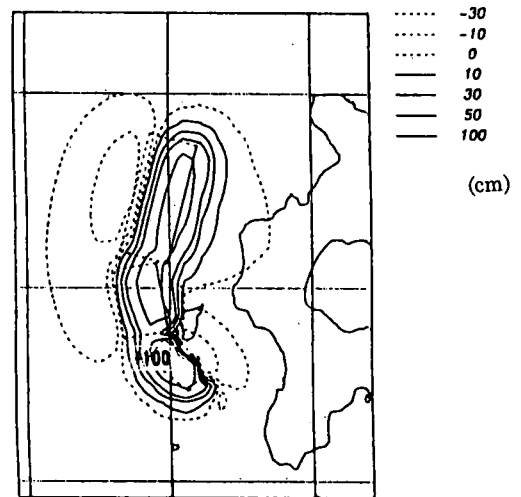


図-6 モデル 2 による地殻の理論上下変動分布

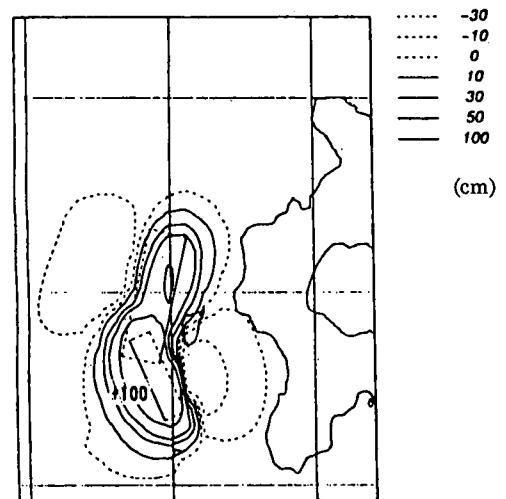


図-7 モデル 3 による地殻の理論上下変動分布

5. 1993 年北海道南西沖地震の三次元津波伝播解析

一般に、津波波高には海底地盤の上下変動量が大きく寄与している(渡辺(1985))。従って、奥尻島の数 10 cm に及ぶ沈降は奥尻島、北海道西岸地区を襲った津波に大きく影響していると考えられる。そこで、奥尻島の沈降をよく表現することのできた断層モデル 1～3 を用いて三次元津波伝播解析を行った。

図-8 に北海道西岸地区江差における計算結果を示す。モデル 3 は静的解析を用いることを前提としたモデルであるため、ここではモデル 1、2 についての動的解析の結果と検潮記録を示す。押し波第一波が最大になる時刻は、モデル 1 では約 180 秒、モデル 2 では約 320 秒検潮記録より早い結果となっている。1993 年北海道南西沖

地震では、1983 年日本海中部地震に比べて検潮井戸のフィルター特性による著しい影響がなかった(岡田ら(1994)) ことを考慮すると、若干のフィルター特性により、特にモデル 1 については、押し波第一波の到達時刻をよく説明できる。

押し波第一波の最大振幅は、モデル 1 は検潮記録の約 2 分の 1、モデル 2 は検潮記録の約 2 倍になっており、対応が良くない結果となった。モデル 1 の最大振幅が小さい原因としては、モデル 1 のすべり量は平均値を用いており、浅い部分に集中する大きくすべった領域を考慮していないことが考えられる。

Rayleigh 波によると思われる短周期の海面変動は、モ

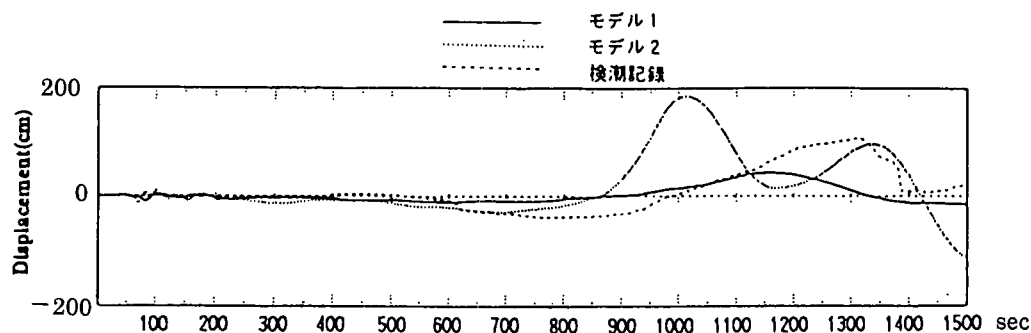


図-8 江差での計算波形と観測波形

デル1, 2の動的解析の結果にわずかに現れている。1993年北海道南西沖地震では、発震直後に奥尻島周辺海域において、短周期の海面変動が発生している(北海道新聞社(1993))。本解析結果に現れている短周期の海面変動が原因であった可能性もある。

6. ま と め

1. 動的地盤変位が津波及び短周期の海面変動の振幅に与える影響について調べた。その結果、両者とも震源近傍、特に破壊進行方向において振幅が増加することが判明した。震源近傍における津波の最大振幅は動的解析によって評価する必要があるといえる。

2. 1993年北海道南西沖地震について、三次元津波伝播解析を行った。動的解析によって、江差における第一波到達時刻は合理的に説明することができた。振幅につ

いては、各断層モデルによって大きな隔たりがある結果となった。断層モデルを決定する際に重要視される資料の観測精度を高め、その逆解析による細かい断層モデルと本研究による津波解析を併用する必要があると言える。

参 考 文 献

- 首藤伸夫 (1993): 北海道南西沖地震に伴う津波とその教訓, 土木学会誌 1993年8月号, pp. 2-17.
- 渡辺偉夫 (1985): 日本被害津波総覧, 東京大学出版会, p. 26.
- 日野亮太・金沢敏彦・末広 潔・佐藤利典・島村英紀 (1994): 海底地震計群列による1993年北海道南西沖地震の余震分布, 月刊海洋号外 No. 7, pp. 35-42.
- 岡田正実・中村浩二 (1993): 奥尻津波と検潮記録, 月刊海洋号外 No. 7, pp. 123-131.
- 北海道新聞社 (1993): 1993年7月12日北海道南西沖地震全記録, p. 82.