

海底地震に伴う広域地盤と海面の変動状況の可視化

大町達夫¹・松本浩幸²・太田弘次³

¹正会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

²学生員 工修 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 博士課程 (同 上)

³学生員 工学 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 修士課程 (同 上)

従来、震源域での地震動シミュレーションの結果は、ある地点での時刻歴波形として評価されることが多かったが、その場合には空間的な伝播状況の把握が困難であった。そこで、本研究では、地震動の発生、伝播特性について理解を深めるため、その空間的な伝播状況を可視化した。本研究では、離散化波数法を用いた点震源モデルによる半無限弾性体表面での地盤変位と、三次元境界要素法を用いた1993年北海道南西沖地震での奥尻島近傍における地盤変位について可視化し、空間的な広がりを持ったアニメーションを作成した。また、動的な地盤変位を考慮した、北海道南西沖地震による海水面の挙動についても可視化し、津波発生メカニズム、および津波伝播特性などを考察した。

Key Words : visualization, seismic faulting, radiation pattern, SP wave, Rayleigh wave, the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki earthquake, tsunami generation and propagation

1. はじめに

地震工学についてほとんど知識を持たない人や、地震工学を学び始めた人にとって、観測や数値シミュレーションによって出てくる波形やスペクトルのデータなどは、理論的な説明を受けたとしても感覚的には理解しにくいことがよくある。本研究では、点震源モデルを用いた理論地震動解析、および1993年北海道南西沖地震の地震動解析とそれに伴う海面変動のシミュレーション結果を可視化する。そして、その空間的な広がりを目の当たりにすることによって、地震動および海面変動の持つ特性について理解を深めようとするものである。

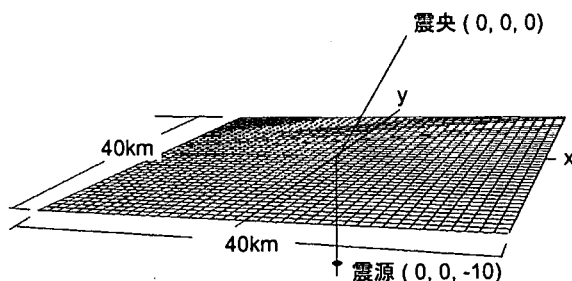


図-1 点震源モデルと可視化範囲

2. 点震源モデルによる地震動の可視化

離散化波数法を用いて、単純な点震源モデルによる半無限弾性体表面での応答変位¹⁾の可視化を行った。一例として図-1に示す点震源モデルによる理論地震動の可視化を行う。震央を原点として、 x 軸、 y 軸方向に40kmの範囲を1km格子間隔で計算した。設定した断層パラメータを表-1に示す。断層は、傾斜角90°の横ずれ断層と傾斜角30°の縦ずれ断層を設定した。

図-2に横ずれ断層、図-3に縦ずれ断層の表面応答のスナップショットを示す。P波とS波のラディエーションパターンについて確認できるだけでなく、SV波から生成されるSP波についてもその方位特性を確認でき

表-1 点震源モデルの断層パラメータおよび地盤条件

震源座標 (km)	(0, 0, -10)
傾斜角 (°)	90, 30
すべり角 (°)	0, 90
平均すべり量 (m)	0.5
立ち上がり時間 (sec)	1.0
P 波速度 (km/sec)	7.0
S 波速度 (km/sec)	4.0

る。SP波は、波の入射角が次式で表される臨界角を越える領域で見られる。

$$I_c = \sin^{-1}(V_s/V_p) \quad (1)$$

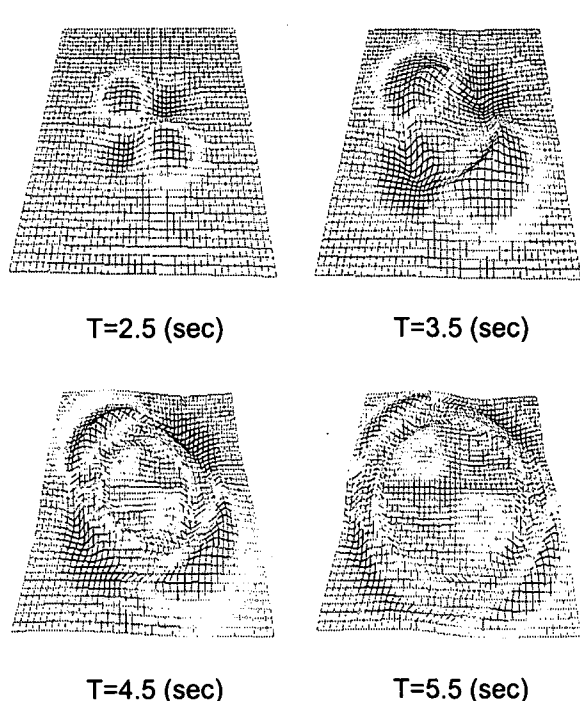


図-2 傾斜角 90°の横ずれ断層の表面応答

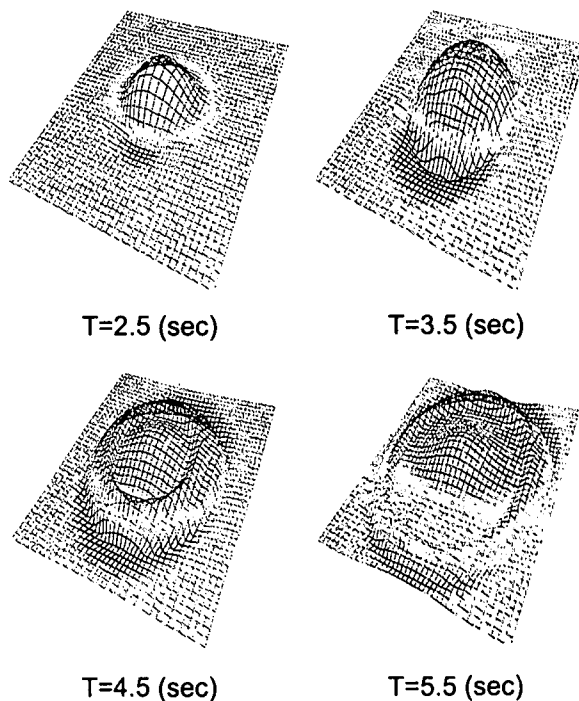


図-3 傾斜角 30°の縦ずれ断層の表面応答

図-2と図-3を比較すると、縦ずれ断層による永久変位は横ずれ断層の場合より大きくなる。大きな永久変位が海底地盤上に出現する場合には、津波を引き起こす。そこで、実際に日本近海で津波を引き起こした地震の地震動と津波発生・伝播状況の可視化を行う。

3. 1993年北海道南西沖地震の地震動と海面変動の可視化

(1) 断層モデルと計算モデル

1993年北海道南西沖地震の奥尻島近傍における海底地盤変位、ならびに地震動により攪乱される海面変動²⁾の可視化を行った。断層モデルは、表-2に示すように北断層、南断層、局所断層の3つの断層面から構成されている。計算は三次元境界要素法を用いて、海底地盤の鉛直変位を算定した。得られた動的地盤変位を海底面に時々刻々入力して海水面の変動を有限差分法を用いて計算した。

計算領域、および断層面の位置を図-4に示す。計算領域は、震央を中心に南北220km、東西200kmの範囲である。海底地盤の計算に用いた境界要素の格子間隔は4km、周波数範囲0～2Hzを計算した。断層破壊開始時刻は、北断層が時刻0、南断層が時刻23.3秒、局所断層が時刻46.6秒とした。流体部分の計算は、空間格子4km、時間格子0.25秒とし、沿岸部での遡上は考慮に入れず、海岸線は鉛直壁と見なして完全反射条件、外

表-2 北海道南西沖地震の断層パラメータ

断層	北断層	南断層	局所断層
長さ (km)	110	90	30
幅 (km)	70	70	20
上縁深さ (km)	5	2	2
走向 (°)	200	160	160
傾斜角 (°)	30	30	60
すべり角 (°)	100	90	90
平均すべり量 (m)	0.76	0.72	3.00
破壊伝播速度 (km/s)	3.0	3.0	3.0
立ち上がり時間 (sec)	3.0	4.5	4.5

海と計算領域との境界も完全反射条件としている。

(2) 北海道本土の津波波形

図-5に北海道本土の江差、岩内での津波計算波形を示す。江差では地震発生700秒後、岩内では900秒後に津波が最大波高となる。岩内での目撃による津波来襲時刻は約900秒後⁴⁾であるから計算結果とほぼ整合する。江差では地震発生60秒後、岩内では40秒後と80秒後に津波に先行する海面変動があり、この種の海面変動は検潮記録にもある。次に、津波とそれに先行した海面変動の到来方向などを検討するために、海底地盤、お

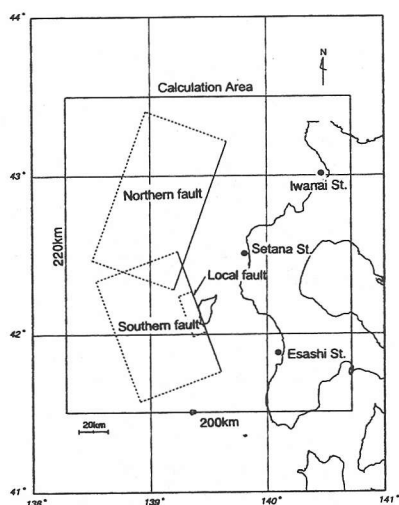


図-4 計算領域および断層面の位置

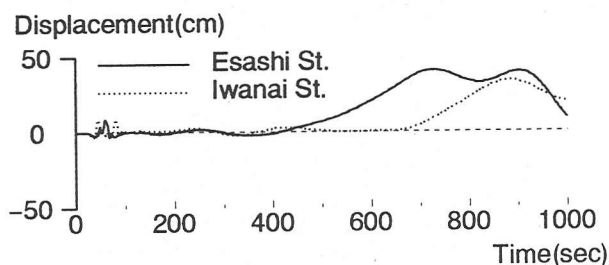


図-5 江差、岩内の津波計算波形

よび海面変動の可視化を行う。

(3) 北海道南西沖地震による地盤変位の可視化

図-6に地震発生から20秒、40秒、60秒、100秒後の海底地盤変位のスナップショットを示す。地震発生20秒後に北断層直上が大きく隆起する。40秒後に北断層からのRayleigh波が、北海道南西岸に到達する(図中A)。このRayleigh波の出現幅は、北断層の断層長さにほぼ一致している。破壊開始60秒後に、奥尻島西側で海底地盤が大きく隆起する。このとき、南断層からのRayleigh波が北海道南西岸に到達している(図中B)。この場合にも、Rayleigh波の出現幅は、南断層の断層長さにほぼ一致している。北断層、南断層ともにRayleigh波は、断層の東側一方向にしか伝わっていない。破壊開始から100秒後に、海底地盤は永久変位に落ち着いている。海底地盤の永久変位を見ると、奥尻島は数十cmの沈降域になっている(図中C)。これは、GPS測量による奥尻島の地殻変動⁵⁾と調和的である。また、奥尻島西部に100cm以上の隆起域が存在する(図中D)。

(4) 北海道南西沖地震による海面変動の可視化

図-7に津波発生時の海面変動のスナップショットを20秒毎に示す。地震発生20秒後に北断層直上で海面変動が現れる。動的地盤変位の影響で60秒後に海面が大きく上昇する。津波と比較して格段に大きな速度で、40

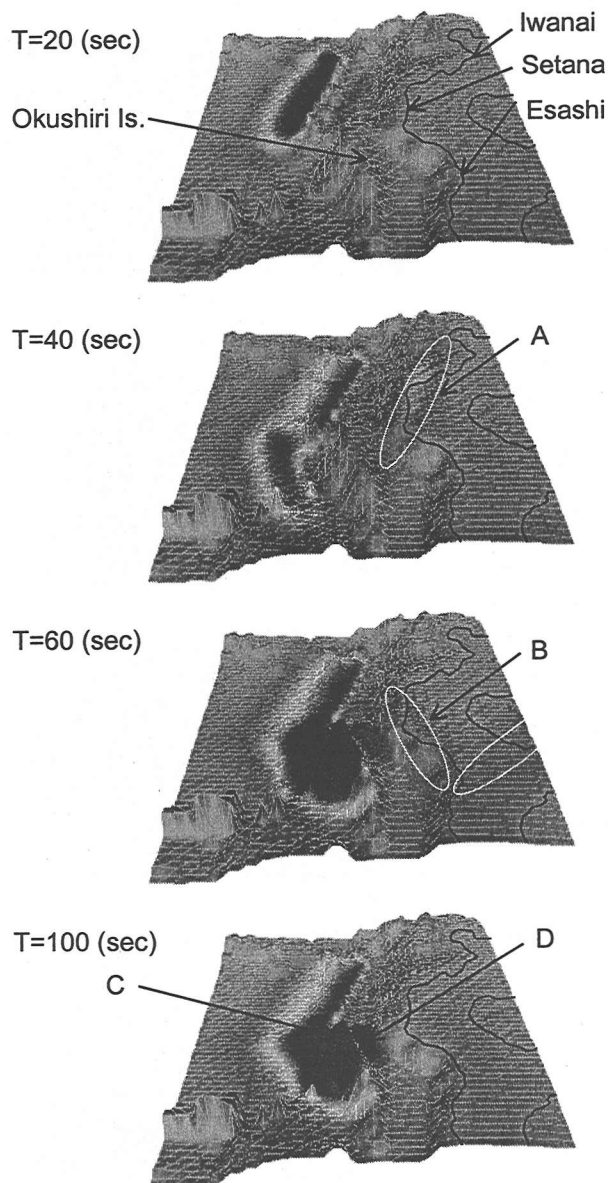


図-6 海底地盤変位図(白線はRayleigh波を示す)

秒後(図中A'), 60秒後(図中B')に北海道南西岸に到達する海面変動がある。これは、海底地盤を伝わるRayleigh波による海面変動である。つまり、先述の江差、岩内での津波に先行する海面変動は、Rayleigh波による海面変動である。この海面変動は、北断層、南断層の両断層から発生するため、岩内では2波出現した。江差で1波しか出現しなかったのは、江差付近で2波が重なったためである。

図-8に地震発生後300秒、500秒、600秒、800秒の津波伝播のスナップショットを示す。地震発生300秒後に北海道南西岸に津波が到達する。500秒後に北断層からの津波と南断層からの津波が、瀬棚付近で重なり合って最大波高を示し、600秒後に南北に分離する。江差、岩内に到達する津波は、北海道本土の海岸線に沿って伝播する。

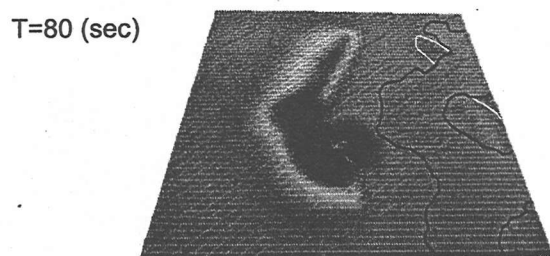
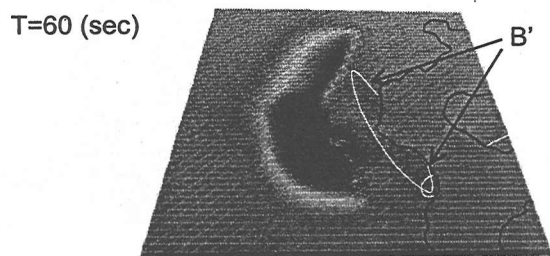
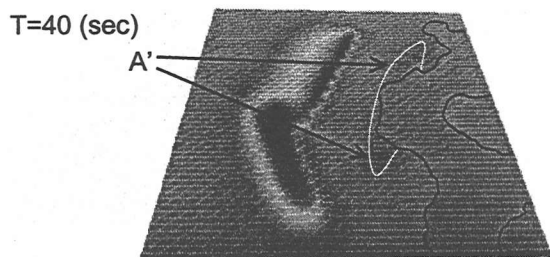
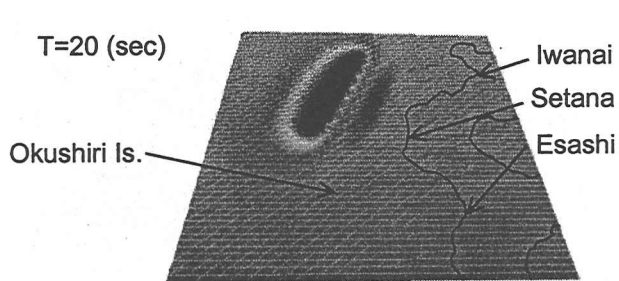


図-7 津波発生時の海面変動（白線はRayleigh波による海面変動を示す）

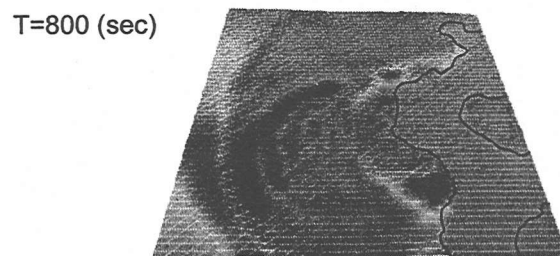
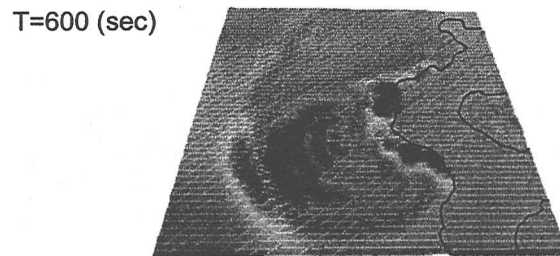
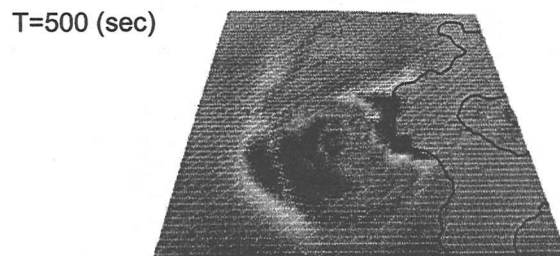
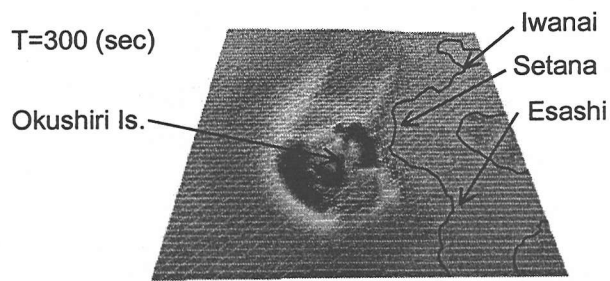


図-8 津波伝播状況

4. まとめ

可視化は波動伝播を理解するのに非常に有効な手段であり、本研究では次のような結論が得られた。

1. 離散化波数法を用いた点震源モデルの可視化では、ラディエーションパターンとSP波の出現が確認できた。また、縦ずれ断層では、永久変位が大きくなることも確認できた。
2. 北海道南西沖地震の海底地盤変位の可視化では、北断層、南断層から出るRayleigh波の伝播特性を把握できた。
3. 北海道南西沖地震の海面変動の可視化では、津波に先行するRayleigh波による海面変動が現れ、その伝播特性を確認できた。また、津波伝播状況を把握できた。

参考文献

- 1) 須田順也, 大町達夫: 点震源モデルを用いた半無限弾性体表面での地震動特性の評価, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 第1部(B), pp.346-347, 1996.
- 2) 大町達夫, 築山 洋, 松本浩幸: 断層運動に伴う動的地盤変位を考慮した津波シミュレーション, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.58, pp.1-14, 1998.
- 3) Mendoza, C., Fukuyama, E.: The July 1993 Hokkaido-Nansei-Oki, Japan, earthquake: Coseismic slip pattern from strong-motion and teleseismic recordings, *J. Geophys. Res.*, 101, pp.791-801, 1996.
- 4) 首藤伸夫・松富英夫・卯花政孝: 北海道南西沖地震津波の特徴と今後の問題, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.236-240, 1994.
- 5) 橋本学, 小沢慎三郎, 吉村愛一郎, 鷲谷威, 多田亮, 辻宏道: 北海道南西沖地震に伴う地殻変動と断層モデル, 月刊 海洋, 号外No.7, pp.55-61, 1994.