

北海道南西沖地震による津波と奥尻島青苗地区での 津波の氾濫解析

山下隆男*・高林 努**・土屋義人***

1. 緒 言

1993年7月12日22時過ぎに発生した北海道南西沖を震源とする地震による津波は、248名に及ぶ死者・行方不明者を出す大惨事となった。特に震源近くの奥尻島では、地震発生後5分という短時間で来襲した津波によって多くの人命が失われた。奥尻島藻内では最大遡上高30.6mにおよび、北海道渡島半島においても遡上高が7mを超える津波が観測された。

この津波の遡上高や被災状況の調査は発生後速やかに行われ、地震学会で発表されている。これらを要約すると、(1)津波高が7-8mに達するのは藻内、初松前北東部および青苗北部の津波侵入域のごく一部。(2)青苗では西から第1波、東から第2波が来襲。(3)北海道本島の島牧村から大成町にかけて高い。(4)青苗地区の氾濫水の湛水深は3mをやや越える程度。のようである。

さらに、津波の伝播の数値シミュレーションも、加藤・都司(1993)、今村ら(1993)、および佐竹・谷岡(1993)により行われ、断層モデルの特定が試みられた。いずれも「く」の字型の2枚断層を考え、西落ち高角および東落ち低角の断層モデルを検討しているが、加藤・都司(1993)、今村ら(1993)は東落ち断層を支持し、佐竹・谷岡(1993)は判定不可能としている。

地震発生当初は日本海中部地震と同様に、ユーラシアプレートが北米プレートの下に沈み込む東落ちの逆断層であると考えられていたが、地震学的調査結果からは西落ち高角逆断層である可能性が高いことから、断層モデルの試案として、防災科学技術研究所(1993)により「く」の字型の2枚の断層面を持つ西落ち高角断層と東落ち低角断層の2種類の断層モデルが提案された。本研究では、この断層モデルを用いて津波伝播の数値解析を行い、津波の遡上高の観測結果(加藤・都司, 1993)との比較からどちらの断層モデルがより津波の伝播を再現できるかを検討し、さらに青苗地区周辺での津波伝播、氾濫の詳細な数値シミュレーションを行う。

2. 数値モデル

2.1 津波の伝播モデル

陸上への遡上計算を含む津波の数値解析には、非線形項の処理が適切な数値モデルが必須であり、非線形項の離散化に起因する数値粘性の除去に配慮することが肝要である。本研究では、山下・山中・土屋(1991)の数値モデルを用いる。このモデルは、基礎方程式を移流計算、水平拡散計算および伝播計算の3段階時間分割法を用いて、各項に最も適した計算スキームを用いている。拡散計算にはADI法、伝播計算にはIterative ADI法を適用し、移流計算には高次の特性曲線法(Two-point Fourth-order Scheme)を用いて数値粘性を抑制してある。

また、陸上への氾濫を計算するための移動境界条件は、以下のようにモデルに導入する。このモデルでは、伝播計算は全水深の時間差 $\Delta Z = Z^{n+1} - Z^n$ に関する楕円型微分方程式に変形されているため、これを差分化する際に格子点 $(i-1, j) - (i, j)$ および $(i, j) - (i+1, j)$ で近似するが、 γ はこの2階の微係数を離散系で記述するための格子点の情報の重みを表すパラメーターであり、流れの方向を考慮したときの重みパラメーターを β とすると、両者は次式で示される。

$$h_{i+\frac{1}{2}} = \beta h_{up} + (1-\beta) h_{dw} = \gamma_{i+\frac{1}{2}} h_{i+1} + (1-\gamma_{i+\frac{1}{2}}) h_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

フロント部での流れは水面勾配と底面摩擦が支配的であることから、これらがつり合うよう運動を仮定すると、次式で記述される。

$$gh \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)から、流れの方向が正の場合には、

$$h_{i+1} = h_{dw} \rightarrow \gamma_{i+\frac{1}{2}} = 1 - \beta \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、流れの方向が負の場合には、次式のようなになる。

$$h_{i+1} = h_{up} \rightarrow \gamma_{i+\frac{1}{2}} = \beta \quad \dots\dots\dots (4)$$

フロント部での流れは水面勾配と底面摩擦が支配的であることから、これらがつり合うとして、その x 方向の

* 正会員 工博 京都大学助手 防災研究所
 ** 学生会員 京都大学工学部交通土木工学科
 *** 正会員 工博 名城大学教授 学部新設準備室

運動を次式で表す。

$$\frac{Z_{up}-Z_{dw}}{\Delta x} + \frac{Q_x|\vec{Q}|}{C^2h^3} = 0, \quad \frac{\partial Q_x}{\partial Z_{dw}} < 0 \dots\dots\dots (5)$$

y 方向についても同様の式を用いる。式(5)中の $|\vec{Q}|$ は数値計算上は x 方向についてのみに考えているので、 Q_x に等しいとする。このような簡略化を行い、 Q_x について整理し、 $h_{i+\frac{1}{2}} = \beta h_{up} + (1-\beta)h_{dw}$ を用いると、 β の表示として次式を得る。

$$\beta = \frac{3(Z_{up}-Z_{dw})-h_{dw}}{3(Z_{up}-Z_{dw})+h_{up}-h_{dw}} + \frac{1}{3(Z_{up}-Z_{dw})+h_{up}-h_{dw}} \frac{2\Delta x Q_x}{c^2 h^2} \frac{\partial Q_x}{\partial Z_{dw}} \dots\dots\dots (6)$$

最大流量の定理により限界水深が $\partial Q_x / \partial Z_{dw} \rightarrow -0$ で生じる条件からパラメータ β を計算する。 β が得られたならば、流れの向きにより重み γ を決定でき、これにより流れの上、下流方向への重みを決定することができる。

2.2 波源モデル

地盤の鉛直変動量と同量の水位変化が海水表面に生じて初期波形を形成するという条件を仮定する。地盤の鉛直変動量は断層運動の鉛直成分から推定される。ここでは媒質のポアソン比を 1/4 と仮定した Mansinha・Smylie (1974) による有限矩形断層モデルに対する解析解を与え、断層の時間変化は考慮しない。

ユーラシアプレートが北米プレートの下に沈み込む東落ちの逆断層である可能性と、地震学的調査結果から西落ち高角逆断層である可能性が指摘されているため、防災科学技術研究所 (1993) の断層モデルの試案を用いた。北大の余震域分布から「く」の字型の 2 枚の断層面を持つ西落ち高角断層および東落ち低角断層の 2 種類の断層モデルが提案されており、それぞれの断層パラメータは表-1 に示すようである。

表-1 北海道南西沖地震の断層パラメータ

	西落ち高角断層	東落ち低角断層
M_0	4.8×10^{27} dyne·cm	6.8×10^{27} dyne·cm
北断層長さ	90 km × 25 km	90 km × 50 km
南断層長さ	75 km × 15 km	75 km × 25 km
北断層変位	(400 cm, 21 cm)	(100 cm, 10 cm)
南断層変位	(500 cm, 0 cm)	(300 cm, 0 cm)
北断層滑り角	55°	-35°
南断層滑り角	55°	-10°
北断層走向	N 181°E	N 9°E
南断層走向	N 145°E	N 35°W

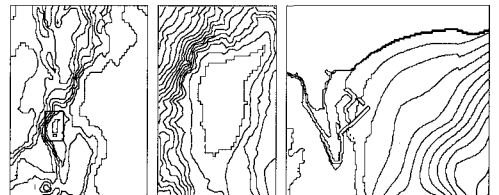
3. 津波伝播の数値シミュレーション

3.1 計算領域および条件

計算領域は津波の波源から北海道沿岸を含む広領域、奥尻島周辺の狭領域、および奥尻島南端の青苗地区周辺の氾濫計算領域の 3 領域とし、それぞれの領域の水深および関係を図-1 に示す。計算は各領域の接続計算とし、狭領域から広領域への反射波は考慮していない。また、計算の諸条件は表-2 に示すようである。計算領域の接続の影響を調べるため、広領域条件から狭領域条件への接続のテスト計算を行った。テスト地形は一様勾配の直線水路、初期条件は静水状態とし、波高 2 m の正弦波を入射させて伝播計算を行った。図-2 に計算結果の一例を示すように、適切な接続計算ができています。

3.2 広領域計算による断層モデルの特定

西落ち高角断層および東落ち低角断層の 2 つの断層モデルに対して広領域での津波の伝播計算を行い、津波の遡上高さの調査結果と比較する。図-3 は西落ち高角断層を仮定した場合の北海道沿岸での計算された津波波高と遡上高さの調査結果との比較を示す。図中、実線は北海道本島において、証言および痕跡を実測調査して得られた津波遡上高 (加藤・都司, 1993) を北 (寿都町) から南 (上ノ国町) の順に示したもので、陰影を付けた棒



(a) 広領域 (b) 狭領域 (c) 氾濫計算領域

図-1 北海道南西沖地震津波の計算領域とその海底地形

表-2 数値計算条件

	Δx	Δy	Δt	計算時間
広領域	1,800 m	1,350 m	6 sec	30 min
狭領域	600 m	450 m	2 sec	20 min
氾濫域	25 m	25 m	0.5 sec	20 min

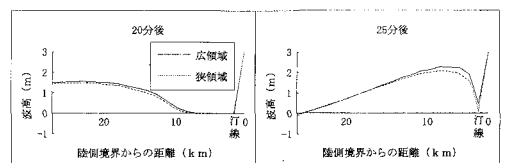


図-2 接続テスト計算による広領域と狭領域の波形の比較

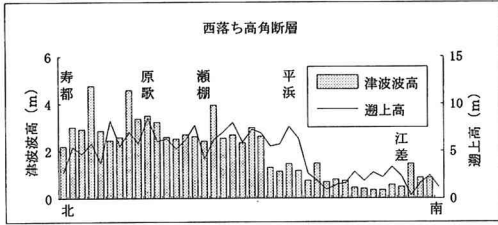


図-3 西落ち高角断層を仮定したときの北海道沿岸における津波の波高と遡上高の観測結果の沿岸分布

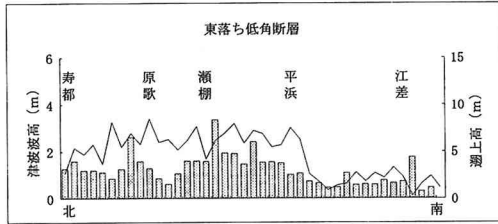


図-4 東落ち低角断層を仮定したときの北海道沿岸における津波の波高と遡上高の観測結果の沿岸分布

グラフは計算結果である。また、図-4は東落ち低角断層を仮定したときのそれである。

遡上高は津波波高の2～3倍であるとする、粗いメッシュであるにもかかわらず、図-3に示す西落ち高角断層の場合は北海道沿岸での津波の波高分布を良く再現していると言えそうである。とくに、津波の特性(3)北海道本島の島牧村から大成町(図中の平浜)にかけて高い、と言う結果が再現できている。しかしながら、図-4の東落ち低角断層の場合には全体的に津波波高は低く、瀬棚町以北の波高分布が再現できていないようである。いずれにしても、両者の比較からは、明らかに西落ち高角断層を支持する結果が得られている。以下では、西落ち高角断層モデルを用いて津波の伝播計算を行う。

3.3 津波の伝播特性

広領域における津波の伝播特性を表現するため、空間波形の時間変化を図-5に示す。これより、津波発生後5分では奥尻島を通過し北海道本島の上ノ国町および瀬棚町に、10分ではほぼ全域に津波の先端が到達していることがわかる。また、島牧村から大成町にかけて高いと言う調査結果は、奥尻島で屈折した津波がここに集中した結果であることも理解される。奥尻島周辺では、南端部の浅瀬で屈折、浅水変形して島の背後に高い津波が来襲している様子がわかる。

図-6に奥尻島での計算された津波波高と遡上高さの調査結果との比較を示す。図中、実線は奥尻島において、証言および痕跡を実測調査して得られた津波遡上高(加藤・都司, 1993)を奥尻島北端の稲穂地区から西まわり

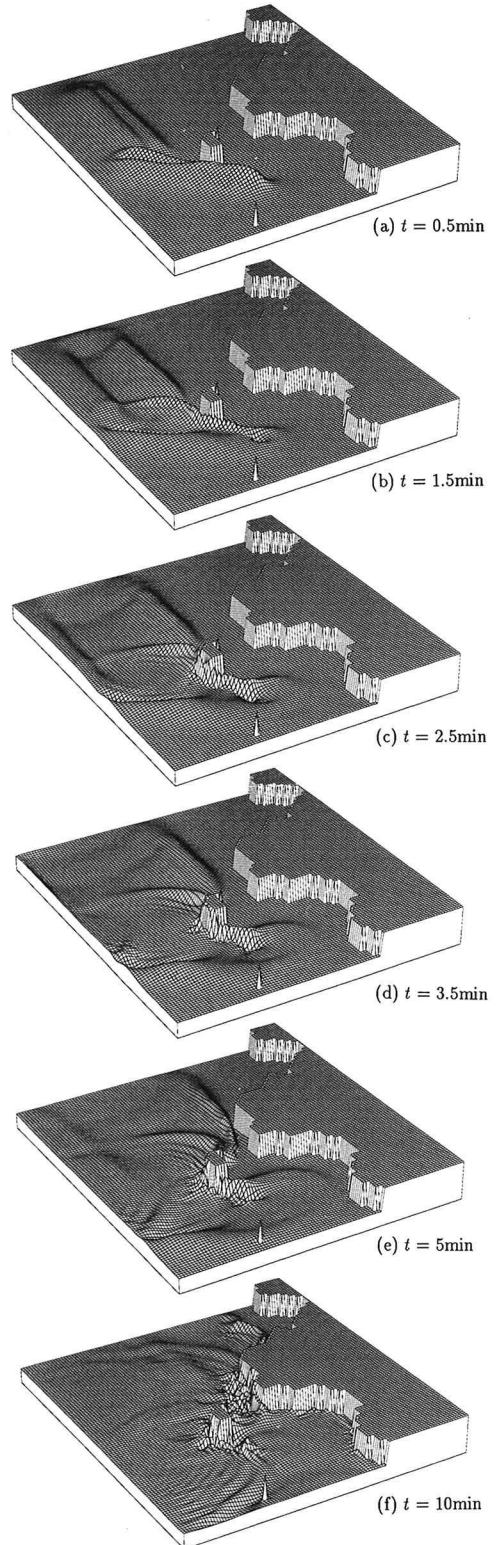


図-5 広領域における津波の空間波形の時間変化

に示したもので、陰影を付けた棒グラフは計算結果である。これによると今回の津波の最大遡上高 30.6 m を記録した藻内以外はほぼ一致している。図-7 に狭領域での津波空間波形の時間変化の一部を示す。これより、奥尻島南部の浅瀬により屈折した波が青苗地区の東側へ廻り込んでいく様子がわかる。

3.4 青苗地区での津波の氾濫

青苗地区での津波の挙動および氾濫の様子は、図-8 に示した氾濫計算領域での空間波形の鳥瞰図(a)およびグレースケール表示(b)と流速ベクトル(c)によく表されている。図-8(a)は南東方向から青苗地区とその周辺海域の水位を観た図で、最大値地盤高 15 m までの表示である。また、(b)はそれをグレースケールで表示したイメージ図で、白い部分が高波高を示す。(c)には海岸線、防波堤(漁港 4.5 m, 鉛直護岸 3.0 m) および 10 m 地盤高のコンター上に流速ベクトルを表示している。これらの図から、津波の伝播、氾濫の過程は次のようであったことがわかる。(1) 地震(津波)発生後 6 分では、南部の青苗岬の地区が津波に洗い流されている。(2) 8 分では、岬を回り込んだ津波が漁港北側に到達している。(3) 9~10 分では、海岸沿いに西進した津波の一部が漁港北側の海岸堤防に堰止められる形で波高を増幅し、青苗地区に氾濫している。

漁港の堤防沿いの津波の高さから判るように、津波の一部が防波堤を越流しているが、堤防の高さは津波による重大な被害を防ぐのには十分であったと考えられる。しかしながら、防波堤を回折した津波と海岸線を西進してきた津波とが港の防波堤で堰止められ、青苗地区の氾濫を大きくしている。

4. 結 語

以上、数値モデルを用いて北海道南西沖地震津波の数値シミュレーションを行い、北海道南海域での津波の伝播特性および青苗地区周辺での津波の伝播、氾濫の特性を検討し、以下の成果を得た。

(1) 断層モデルとして西落ち高角断層と東落ち低角断層の 2 つのモデルについて北海道沿岸での津波波高の分布を計算し、遡上高さの調査結果と比較した結果、西落ち高角断層が北海道沿岸での津波の波高分布をよく再現できることが示された。

(2) 津波遡上高の特性として、北海道本島の島牧村から大成町にかけて高いという調査結果は奥尻島で屈折した津波がここに集中した結果であることが示された。また、津波発生後 5 分では奥尻島を通過し北海道本島に到達し、約 10 分では渡島半島全域に津波が到達していることが示された。

(3) 奥尻島青苗地区では地震後約 5 分で津波の第 1

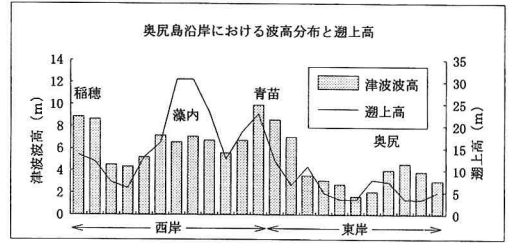


図-6 奥尻島沿岸における津波の遡上高の観測結果と計算された波高の沿岸分布

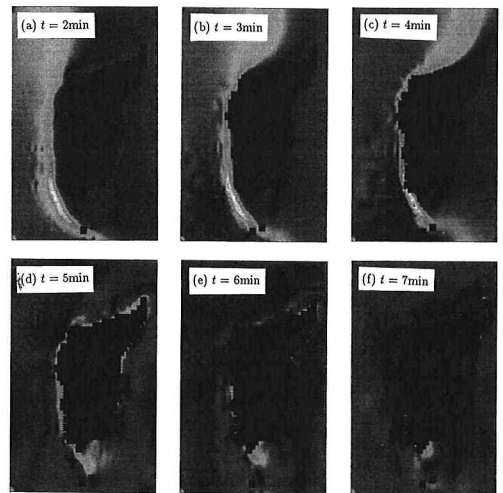
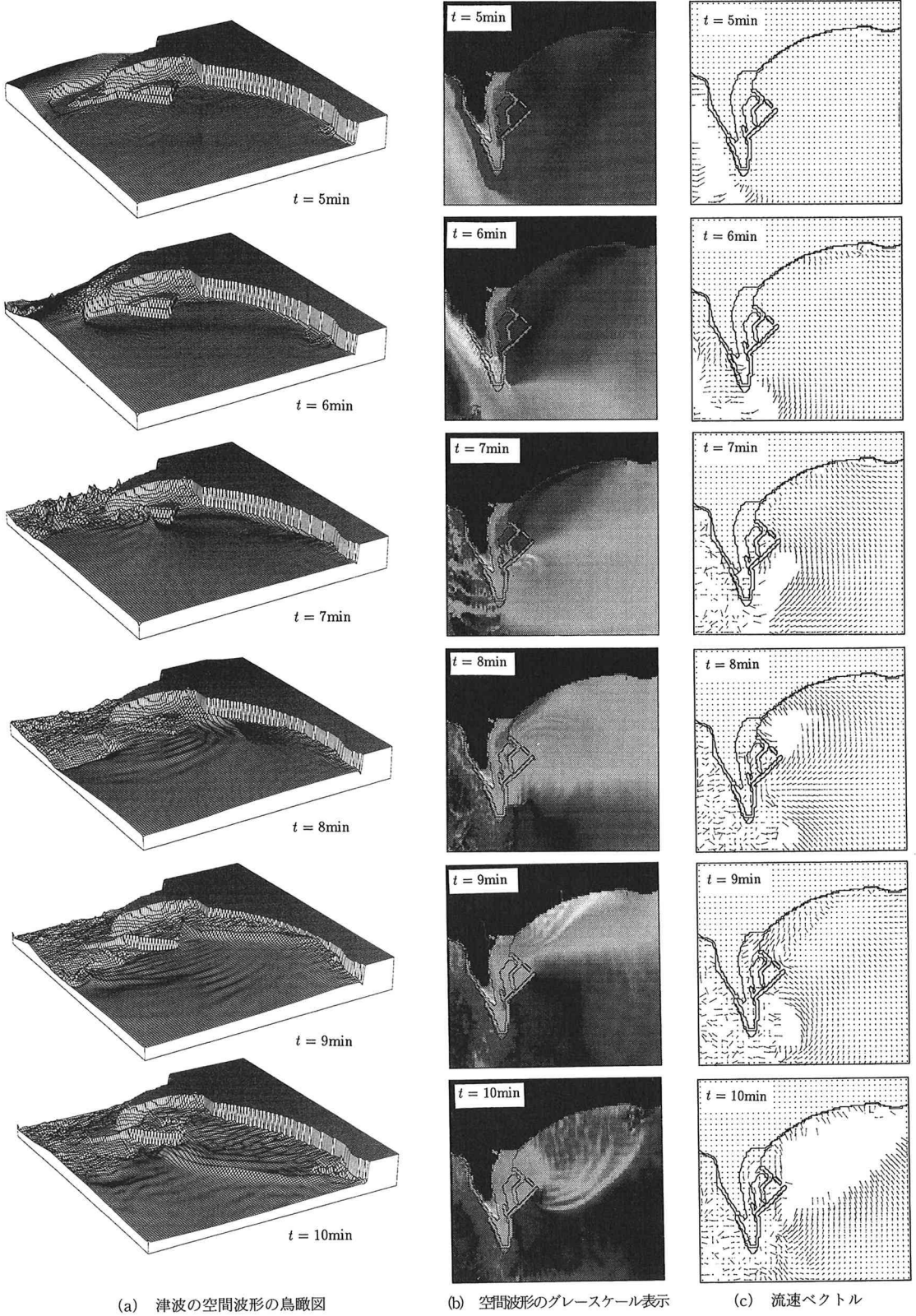


図-7 狭領域における津波の空間波形の時間変化

波が来襲し南端の地区に氾濫した。次いで約 9 分後には第 2 波が来襲し北側の地区に氾濫した。

参 考 文 献

- 今村文彦・高橋智幸・川俣 奨・M. Ortiz・高橋武之・首藤伸夫 (1993): 津波解析から推定される 1993 年北海道南西沖地震のメカニズムに関する検討, 日本地震学会講演予稿集, 秋季大会, p. 55.
- 加藤健二・都司嘉宣 (1993): 北海道南西沖地震による津波波高の数値計算と実測値との比較, 日本地震学会講演予稿集, 秋季大会, p. 54.
- 佐竹健治・谷岡勇市郎 (1993): 1993 年北海道南西沖地震による津波と日本海の自由振動, 日本地震学会講演予稿集, 秋季大会, p. 56.
- 防災科学技術研究所 (1993): 第 105 回地震予知連絡会資料.
- 宮脇昌弘・嶋本利彦・堤 昭人・佐藤比呂志・川本英子 (1993): 北海道南西沖地震の津波による奥尻町青苗地区の被害状況と災害の要因, 日本地震学会講演予稿集, 秋季大会, p. 47.
- 山下隆男・山中久生・土屋義人 (1991): エスチャーリーにおける長周期波の数値計算—田辺湾の潮流・吹送流シミュレーション—, 京大防災研年報, 第 34 号 B-2, pp. 449-469.
- Mansinha, L. and Smylie, D. E. (1974): The Displacement Fields of Inclined Faults, B. S. S. A., Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.



(a) 津波の空間波形の鳥瞰図

(b) 空間波形のグレースケール表示

(c) 流速ベクトル

図-8 青苗地区での津波の伝播と氾濫