

非線形分散理論モデルによる十勝川津波遡上の再現計算と空間分解能の検討

Numerical Simulation of Tsunami run-up on Tokachi River Using Nonlinear Dispersive Wave Equations Model and Evaluation of Space Grid Size

村嶋陽一¹・越村俊一²・岡 秀行³・村田泰洋⁴・鈴木崇之⁵・今村文彦⁶

Yoichi MURASHIMA, Shunichi KOSHIMURA, Hideyuki OKA, Yasuhiro MURATA
Takayuki SUZUKI and Fumihiko IMAMURA

This study calculated the numerical simulation of Tsunami on Tokachi river with a soliton fission waves and examined the spatial resolution which is necessary for it. The soliton fission waves were recorded on video in Tokachi river at 2003 Tokachi-oki earthquake. We analyzed this video and obtained the continuous location information of soliton fission waves. The numerical simulation of Tsunami run-up using nonlinear dispersive wave equations model was able to reproduce the soliton fission waves. It is necessary to use the space grid size of 1/20 or less of the wavelength of soliton fission waves to calculate the amplification of the wave height by soliton fission.

1. はじめに

津波が河川を遡上する場合、ソリトン分裂波の発生により被害が拡大されることが懸念されている。ソリトン分裂波の影響を検討するため、分散項や碎波項を導入した非線形分散波理論による2次元津波解析モデルが提案されている(例えば、岩瀬ら, 1998; 嶋原・今村, 2004など)。嶋原・藤間(2007)は、分散項をポアソン方程式として解くことで計算時間を短縮する方法を提案している。また、笠原ら(2008)は、河川流量を考慮した碎波項、必要空間分解能について提示している。しかし、実際の河川で、ソリトン分裂波の再現性を検証した実用レベルのモデルは提示されていない。

本研究は、原子力発電所など重要施設への津波による安全評価のため、実用性を重視して開発している非線形分散波理論に基づく2次元数値解析モデル(以下、非線形分散波モデル)を2003年十勝沖地震津波時の十勝川(図-1)に適用する。その上で、この非線形分散波モデルの実用レベルでの評価と、ソリトン分裂波の再現に必要な空間分解能を検証する。

また、本研究では数値計算の検証材料とするため、2003年十勝沖地震津波時に、十勝川上空から撮影された河川遡上するソリトン分裂波群のビデオの画像解析を行

った。この結果、ソリトン分裂波群の波峰位置の正確な分布を時系列的に得ることができたので、合わせて報告する。

2. 2003年十勝川津波遡上ビデオの画像解析

(1) ビデオ画像

使用したビデオ画像には、9月26日AM6:25頃、河口から3~4kmほど上流のエリア(図-1参照)にて、ソリトン分裂波群が30秒間ほど撮影されている。このビデオ画像は陸上自衛隊第5旅団のヘリコプターから撮影された。ビデオには、十勝川の左岸側から右岸側に移動しながら、河川遡上した津波第3波の先端からソリトン分裂した後続の波群までが明確に撮影されている。本ビデオ画像および十勝沖地震時の水位観測結果や津波痕跡等については安田ら(2004)に詳しく報告されている。

(2) ソリトン分裂波群の波峰位置分布の作成方法

ソリトン分裂波群と、正射変換に必要な位置の確定が可能な画像から、8秒間隔の3画像を抽出し、静止画像に変換した。図-2に示すように抽出した静止画像の波峰をプロットした後、画像とともに正射変換を行い、図-3に示すソリトン分裂波の波峰位置分布の時経列変化を得た。

(3) ソリトン分裂波群の分布

画像解析の結果、30波近くのソリトン分裂波群が600m程度に渡りほぼ等間隔に連続して分布していた。分裂波群の波長は15~25m(平均20m程度)であった。また、分裂波群の波峰の移動距離と経過時間から求めた遡上速度は5.0~6.0m/sであった。水深の深い右岸側で波長が長く、遡上速度が速くなっていた。

1 正会員	修(水)	国際航業株式会社	海洋担当部長
2 正会員	博(工)	東北大学准教授	大学院附属災害制御研究センター
3 正会員		国際航業株式会社	フェロー
4 修(理)		国際航業株式会社	海洋情報担当
5	修(工)	国際航業株式会社	海洋情報担当
6 正会員	工博	東北大学教授	大学院附属災害制御研究センター

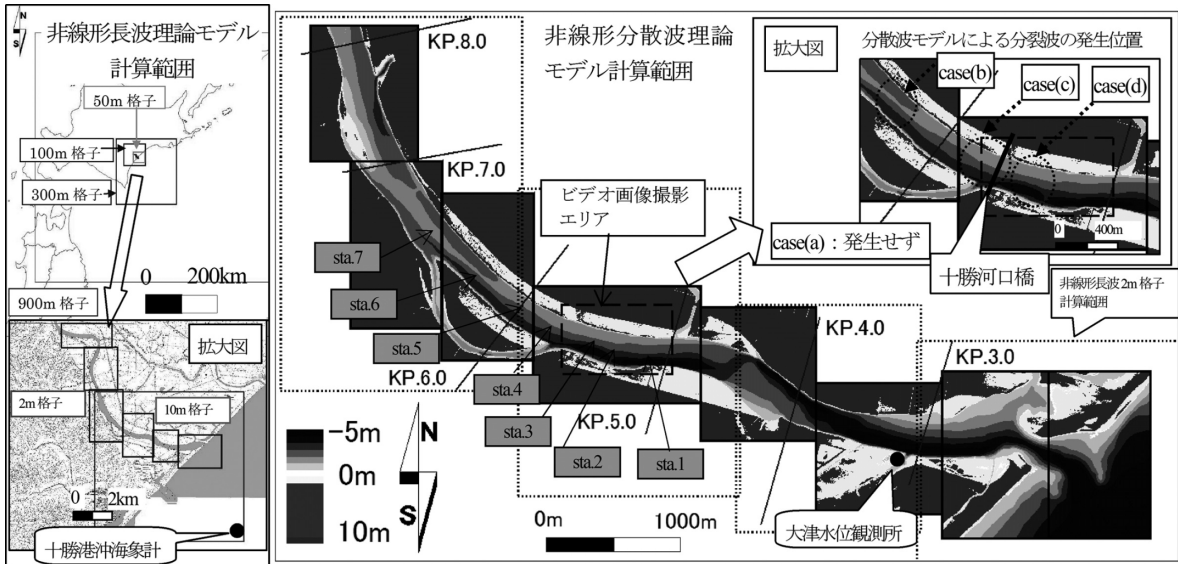


図-1 数値解析の対象範囲（左上：非線形長波理論モデルによる計算範囲，右：非線形分散波理論モデルによる計算範囲（コンター範囲））



図-2 ビデオ画像から抽出した静止画像（波峰のプロット後）

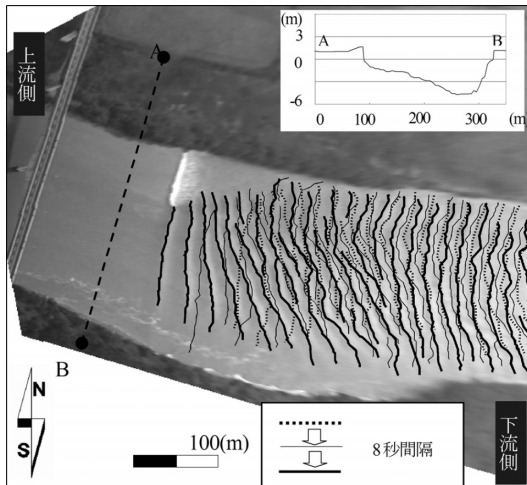


図-3 ソリトン分裂波の波峰位置の経時変化

3. 非線形分散波理論モデル

本研究の津波数値解析には、松山ら（2006）の大型水

路によるソリトン分裂波の造波試験結果を用いて検証した2次元非線形分散波理論モデルを用いた（村嶋ら，2010）。このモデルは、嶋原・藤間（2007）による分散項を陰的に計算する際に、分散項にポテンシャル関数を定義し、分散項をPoisson方程式の境界値問題として解く数値計算手法を用いている。本研究では、分散項にはMadsen-Sørensen式を、移流項の差分スキームには1次精度風上差分を用いた。

以下に使用した非線形分散波理論モデルの支配方程式を示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\psi = \frac{2}{5} h \left[\frac{\partial^2 M}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 N}{\partial y \partial t} \right] + \frac{2}{15} g h^2 \left[\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + f_x = h \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + f_y = h \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$f_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$f_y = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 η は水位、 h は水深、 M 、 N は x 、 y 方向の線流量、 D は全水深、 g は重力加速度、 n はManningの粗度係数である。運動の式中の分散項以外の移流項、圧力項、摩擦項は f_x 、 f_y にまとめて表記した。

4. 2003年十勝川津波遡上の再現計算

本研究では、ソリトン分裂波がビデオ撮影された2003年十勝沖地震津波の十勝川での河川遡上について再現計算を実施した。

2003年十勝沖地震津波は近地津波であるため、沿岸までの伝播過程における線形分散効果は考慮せず、波源～河川内までを非線形長波理論により数値解析を行った。次いで、河川内の水位記録（図-5参照）から推測される範囲で、この数値計算結果の水位を変えた数パターンの境界条件を作成し、非線形分散波理論モデルによる計算を実施した。

(1) 地形モデル

数値解析に用いた河口域から河川内の地形データは、陸域についてはLIDAR計測データ（高さ精度±20cm程度）を、河川水面下については河床断面図を用いて、精緻な地形モデルを構築した（図-1）。このとき、空間分解能によるソリトン分裂波の再現性の比較検討を行うため、格子サイズ0.5m、1.0m、2.0mの3種類の地形モデルを作成した。

(2) 計算条件設定と非線形長波モデル計算結果

本研究における数値計算諸条件を表-1に示す。

数値計算は、波源（900m格子）～河川内（2m格子）まで、非線形長波理論モデルにて数値計算を行った。このとき、潮位は2003年十勝沖地震の発生時のT.P.+59cmと

表-1 本研究における数値計算諸条件

計算範囲	波源～河口	河川内
支配方程式	非線形長波理論	非線形分散波理論
格子サイズ	900, 300, 100, 50, 10, 2.0 m	2.0, 1.0, 0.5 m
接続方法	空間格子：1:2～1:5 全計算領域を同時に実施	空間格子：1:1接続 (並列計算)
時間間隔	0.1 s (全領域)	0.025 s (全領域)
計算時間	地震発生から3時間 (河川流のならし計算：8時間)	地震発生から1時間20分 後から30分間

し、十勝川の上流端に地震発生時の河川流量（240.66m³/s）を入れ、計算が十分に安定してから津波数値解析を実施した。

波源モデルは、十勝港沖海象計の観測記録との整合性を比較検証し、Taniokaら（2004）の提示した14断層のすべり量を1.51倍したモデル値を用いた。断層パラメータからMansinha・Smylie（1971）の方法を用いて地盤変動量を算定し、津波による初期水位変動量とした。また、Manningの粗度係数は全域で0.025とした。十勝港沖海象計（図-1参照）の観測結果（永井・小川，2004）と数値解析結果の水位比較を図-4に示す。

(3) 非線形分散波理論モデルによる数値解析

非線形分散波理論モデルの十勝川への適用は、図-1に示した範囲について、津波第3波が河口に到達した時点からビデオ撮影エリアまで河川遡上する地震発生後80分後～110分後の30分間について実施した。

ここで、沿岸域から河川内への津波の入射状況について、当時の河口地形や砂州形状などが不明であることを考慮し、また、河川への津波の入射状況が数値解析によるソリトン分裂波の形成、発達に与える影響について比較検証するため、case (a)～(d) の4パターンの河口域の入射波データ（境界条件用データ）を作成した。case (a)～(d) は、(2) の計算結果による水位を0.5倍、1倍、1.5倍、2倍して作成しており、図-5に示すように、河口内の大津水位観測所（図-1参照）の10分毎の水位記録と比較して、当時の十勝川へ実際に入射した可能性がある津波規模を考慮して設定した。

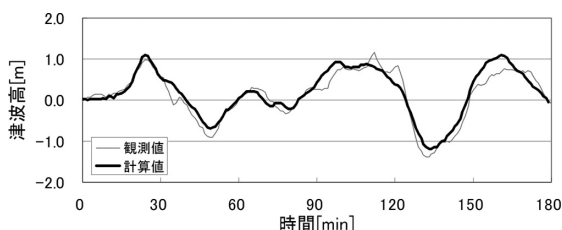


図-4 十勝港沖海象計における水位変化比較

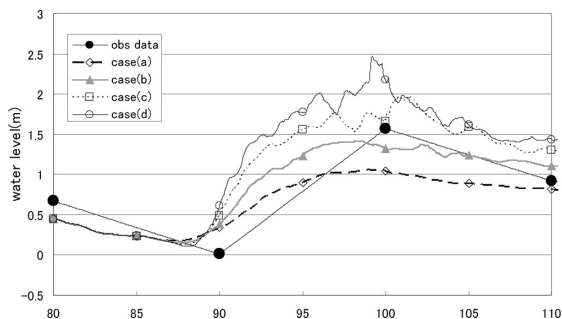


図-5 入射条件ケース毎の計算結果と大津水位観測所の観測結果の比較

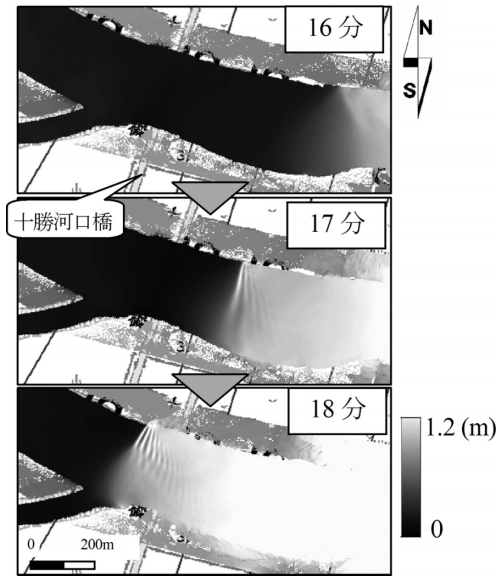


図-6 非線形分散波モデルによる入射条件によるソリトン分裂波の形成 (case(d))

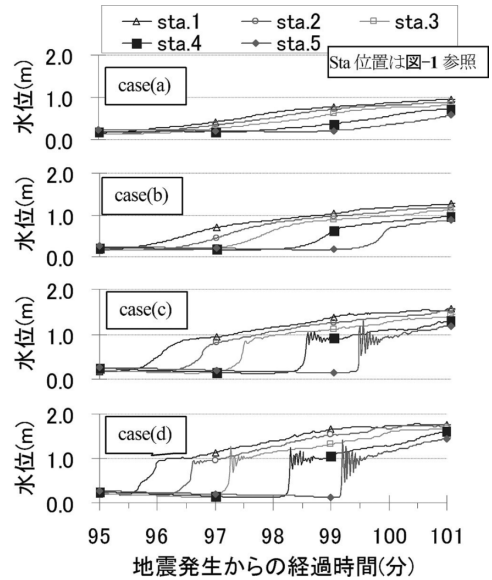


図-7 分散波モデルによる分裂波の形成

5. 津波遡上計算結果の検証

十勝川に適用した非線形分散波理論モデルについて、ソリトン分裂波の形成・発達予測評価における実用レベルでの評価のため、入射波条件によるソリトン分裂波の形成・発達状況と、ビデオ画像から得られたソリトン分裂波群分布との比較検証を実施した。

また、実用レベルにおけるソリトン分裂波の再現に必要なとされる空間分解能について検討するため、ソリトン分裂波の波長との比が1/40, 1/20, 1/10となる格子サイズ0.5m, 1.0m, 2.0mの地形モデルを用いて数値解析を行い、分裂波の形成・発達について比較検討を実施した。

(1) ソリトン分裂波の形成・発達

入射条件を変えて非線形分散波理論を十勝川に適用した計算結果(格子サイズ1.0m)について、ソリトン分裂波群の形成・発達の経時分布を図-6に示す。

case (b), (c), (d) では、河口から3.5～4.5km地点でソリトン分裂波が形成された(図-1参照)。これはビデオ画像でソリトン分裂波が撮影されたエリア(3～4km)とほぼ同じエリアである。数値計算によるソリトン分裂波は入射波が大きいほど河口側で形成され、その波長は15～25m(平均20m程度)とビデオ撮影されたソリトン分裂波群の波長と同じであった。

ソリトン分裂波の形成されたエリアでの計算結果による水位変化を図-7に示す。この図から各caseとも浅水効果により波形が前傾化した状態から分裂波が形成されていく様子がわかる。入射波が大きいcaseほど波形が早く前傾化しており、このことがより下流側で分裂波が形成

されている要因と考えられる。またcase (a) では、計算範囲内で十分に波形が前傾化しなかったため、ソリトン分裂波が形成されなかったと考えられる。

case (d) の水位分布とビデオ画像から得られた波峰の分布位置を重ね合わせ図を図-8に示す。ビデオ画像の正確な時間は不明なため、画像1(図-2参照)の先頭波の波峰と数値計算結果による先頭波の波峰が重なった時点およびその8, 16秒後毎の数値解析結果をそれぞれ画像1～3で得られた波峰分布図と重ねた。この結果、ビデオ画像で得られた波峰分布と数値計算による水位分布は、画像1～3を連続してほぼ同じ分布をしていることがわかる。

この結果、入射波条件によりソリトン分裂波の形成されるエリアが変化するものの、適用した非線形分散波理論モデルでは、実際の十勝川で確認されたソリトン分裂波の波峰分布とその移動を適切に再現できていることが示された。

(2) 空間分解能による比較

0.5m, 1.0mおよび2.0m格子計算の水位の時間変動を図-9, 10に示す。格子サイズ0.5m～2.0m(ソリトン分裂波長比1/40～1/10)による違いは、ソリトン分裂波の形成位置、分裂数、波長には見られない。しかし、ソリトン分裂波が発達している段階(sta.7)では、高分解能計算(0.5m格子計算)の波高に対して、1.0m格子では、0.03m程度(波高比で9%程度)、2.0m格子計算では0.14m程度(波高比で40%以上)低い値となる。この結果から、十勝川でのソリトン分裂波現象を再現するシミュレーションを実施する際は、1.0m格子より小さい空間格子で計算を行うことが望ましいと考えられる。

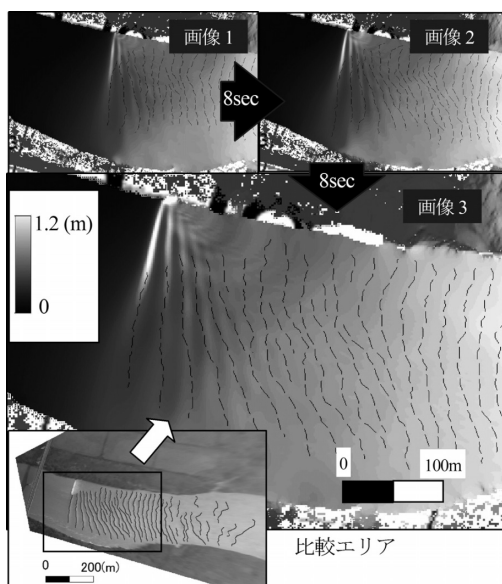


図-8 数値計算結果による水位分布とビデオ画像から得られた波峰の重ね合わせ

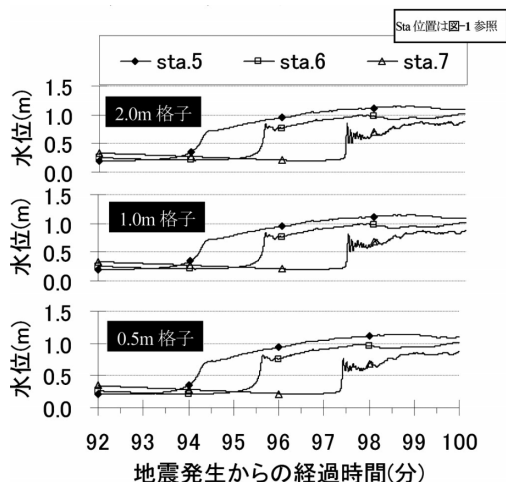


図-9 各空間分解能を用いた数値計算の時系列水位変化

6. まとめ

2次元非線形分散波理論モデルを十勝川に適用した結果、ビデオ画像と同程度の波長のソリトン分裂波が形成され、開発モデルのソリトン分裂波の再現性が示された。

河口での入射波が大きいかほどソリトン分裂波は下流側に形成された。このことから、河川内でのソリトン分裂波の再現には河口への津波の入射の再現精度が求められ、波源から沿岸までの数値計算や、河口の地形モデルの精度も重要となることが示唆される。

格子サイズ0.5m～2.0m（ソリトン分裂波の波長の1/40～1/10に相当）を変えた計算結果では、格子サイズを

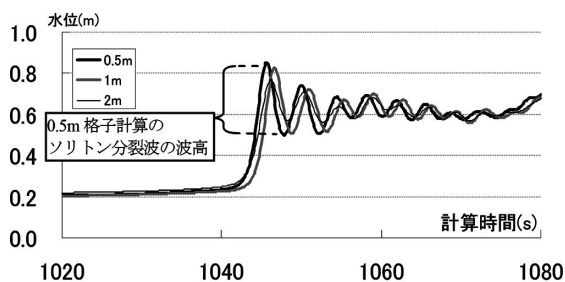


図-10 各空間分解能の時系列水位変化の比較 (sta.7)

2.0mにすると0.5m, 1.0mに比べソリトン分裂波の波高は40%ほど減少した(図-5)。この結果は、村嶋ら(2010)の非線形分散波理論モデルを水路試験結果と比較検証した結果と同様であった。

謝辞：本研究は、原子力安全基盤機構の業務成果及びデータをもとに行っています。陸上自衛隊第5旅団には、貴重なビデオ画像を提供していただきました。また、防衛大学校藤間功司教授、嶋原良典助教にはモデルの作成において、ご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 岩瀬浩之・見上敏文・後藤智明(1998)：非線形分散波理論を用いた実用的な津波計算モデル，土木学会論文集，No.600/II-44，pp.119-124.
- 笠原健治・藤間功司・嶋原良典(2008)：流れを遡る津波の碎波機構に関する研究，海岸工学論文集，第55巻，pp.101-105.
- 嶋原良典・今村文彦(2004)：非線形分散波理論の津波数値解析への適用性と新しい数値モデルの提案，海岸工学論文集，第51巻，pp.246-250.
- 嶋原良典・藤間功司(2007)：津波数値解析における分散波理論モデルの適用性と新しい数値計算法の提案，土木学会論文集，vol63，No1，pp.51-66.
- 永井紀彦・小川英明(2004)：平成15年(2003年)十勝沖地震津波波形特性，港湾空港技術研究所資料，No.1070，92p.
- 松山昌史・池野正明・榊山 勉・武田智吉(2006)：大陸棚上における津波のソリトン分裂と碎波に関する研究，電力中央研究所報告，N05045，27p.
- 村嶋陽一・越村俊一・岡 秀行・村田泰洋・今村文彦(2010)：非線形分散波理論に基づく実用的な津波の河川遡上モデルの開発，土木学会論文集B2(海岸工学)，VolB2-66，No.1(投稿中)
- 安田浩保・渡邊康玄・藤間功司(2004)：2003年9月の十勝沖地震に伴い発生した津波の河川遡上，土木学会論文集，No768/II-68，pp.209-218.
- Tanioka, Y., K. Hirata, R. Hino and T. Kanazawa(2004)：Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from the tsunami waveform inversion，Earth Planets and Space, 56, pp.373-376.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie(1971)：The Displacement Fields of Inclined Faults, Bulletin of Seismic Society of America, 5, pp.1433-1440.