

津波による沿岸林内樹木の被害に関する統計モデルの開発

Development for Statistical Models about Damage of Tree in a Coastal Forest Due to Tsunami

今井 健太郎¹

Kentaro IMAI

A statistical analysis by using the filed data of damage of tree in a coastal forest due to a past tsunami was carried out, and the influence factor that contributed to damage of tree due to tsunami was extracted from a statistical analysis. And then, statistical models were developed by using the filed data. The statistical model for lodging rate explains the actual measurement value well by diameter of tree, root form, dn and tsunami inundation depth. The statistical model for destruction rate explains the actual measurement value well by root form, dn and tsunami inundation depth. In addition, actual probability of occurrence of tree damage and the probability of the present model used inundation depth from tsunami simulation were compared, and suitability of the present model was examined.

1. はじめに

首藤 (1985) は過去の事例津波の記録に基づき, 沿岸林による津波減災の効果やその限界について, 樹木の胸高直径や植生厚みにより事例を整理し検討した. 日本沿岸に限らず, 沿岸林は津波からの面的防御に利用できる可能性があり, 実際に日本海中部地震津波やインド洋津波では沿岸林による津波減勢, 漂流物阻止の実例がある.

樹木の倒伏や破壊限界について様々な研究 (例えば, 田中ら, 2005; 柳澤ら, 2006) が報告されている. 著者 (今井・松富, 2005) は, 沿岸林の倒伏耐力や樹木の剪断強度から沿岸林による津波減勢効果とその限界, そして, 沿岸林被害の予測を試みているが, 陸上地形情報や樹種の選定等, 克服するべき課題も多く, 簡単な予測法とはいえない. しかも, 沿岸域の植生は樹種や地域性により多種多様である. 例えば, クロマツは海岸陸上部に繁茂し根を地中に構えるが, マングローブ域に繁茂するヒルギ (*Rhizophora*) 種は干潟に生息し, 根を大気中に露出させる. このように, 樹種によって繁茂する地盤条件や樹勢が異なり統一的な検討は難しい.

そこで, 本研究では過去の津波事例から沿岸林内樹木の被害発生に関する影響因子を抽出し, その重要度を評価するために実測値に基づき統計解析を行う. そして, 津波規模, 沿岸林規模, 樹種による沿岸林の倒伏・破壊発生率に関する統計モデルを構築し, それらの評価指標を提案することを目的としている.

2. 対象とした事例と実測値の取り扱い

(1) 対象とした津波事例

首藤 (1985) は過去の津波から沿岸林による津波減勢

Root under ground

Root upper ground



Arecaceae etc.

Rhizophoraceae etc.

図-1 根形態の特徴

に関する事例を抽出し, 津波浸水深, 樹木の樹種や胸高直径, 立木密度, 防潮林幅, 被害形態など, 津波事後の限られた状況から得られるほとんどのデータを精力的に集め, 沿岸林域による津波減勢効果や被害形態を議論し, 植生厚み dn (d : 樹木の胸高直径, n : 沿岸方向 1 m あたりの立木本数) により, 沿岸林による津波減勢に関する判定図の作成を行った.

田中ら (2005) はインド洋大津波におけるタイ沿岸域の樹木を対象として, 首藤の研究例に準じた沿岸林による津波減勢効果や被害に関する諸種のデータを集め, 亜熱帯地域の沿岸域に繁茂する多種多様な樹種について分類し, 樹木形状から修正した dn を用いて, 首藤の判定図を再整理している.

本研究では, 樹木被害に関する対象とした事例津波として, 1896年三陸大津波, 1933年三陸大津波, 1946年南海地震津波, 1960年チリ津波, 1983年日本海中部地震における樹木被害データ (首藤, 1985) と, 2004年インド洋大津波に関する樹木被害データ (田中ら, 2005), 2007年ソロモン諸島津波における樹木に関する実測データ (松富ら, 2007) を用いた.

(2) 実測値の取り扱い

現地調査で得られた樹種のうち, クロマツ, モクマオウ, 椰子などは海岸陸上部に繁茂し, 根を地中に構える.

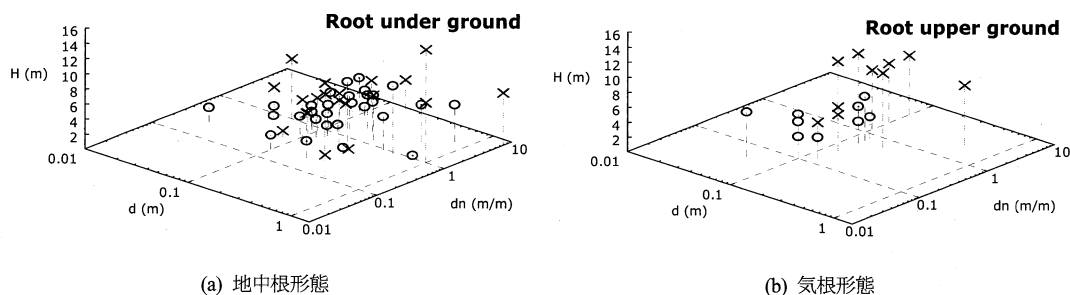


図-2 沿岸林内樹木の被害発生と各実測値の関係

表-1 各実測値の偏相関係数

Multiple correlation coefficient	Type of root	d (m)	dn (m/m)	H (m)
Type of root	1.00			
d (m)	0.27	1.00		
dn (m/m)	0.12	0.31	1.00	
H (m)	-0.43	0.41	0.00	1.00
LOGGING	0.04	-0.37	0.37	0.30
DESTRUCTION	0.22	-0.05	-0.32	0.58

一方で、ヒルギ (*Rhizophora* 等) は干潟に生息し、根を大気中に露出させる。図-1に本研究で分類する樹種の植物学的な特徴を示す。樹木は樹種により枝葉の付け方や、根の張り方等、多種多様である。樹種による詳細な分類は今後の検討課題であるが、本研究では特徴的な生息形態の分類方法として根形態に着目した。これは繁茂する地盤条件に関わるため、沿岸林被害の発生率に影響があると考えられる。本研究では、根を地中に構える樹木類を地中根形態(クロマツ、アカマツ、ニセアカシア、モクマオウ)、根を大気に露出する樹木類を気根形態(ヒルギ等)とし、2種類に分類する。

統計解析に用いる実測値は、沿岸林内樹木の被害発生に関する代表的な外力として津波浸水深 $H(m)$ 、樹木の力学的特性の代表として胸高直径 $d(m)$ 、沿岸林規模を記述し得る植生厚み $dn(m/m)$ と根形態とした。根形態(以下、 TOR とも記す)に関しては、地中根形態と気根形態を区別し、ダミー変数を用いて2値化した(地中根形態: $TOR=1$ 、気根形態: $TOR=0$)。実測値のサンプル数について、 dn を含まない場合は105サンプル、 dn を含む場合77サンプルである。評価対象としては、測定者の主観が入りづらいと思われる沿岸林内樹木の被害とした。被害の分類については、ダミー変数を用いて2値化し、樹木倒伏の有無(倒伏有り: 1、倒伏無し: 0)、樹木の折損や抜根等、破壊の有無(破壊有り: 1、破壊無し: 0)とした。なお、樹木被害の発生要因となる物理量として津波氾濫流の最大流速(柳澤ら、2006)が重要と考えられるが、実測値として得ることの難しさや陸上氾濫を含む津波数値解析が必要となるため、本研究では考慮しない。

図-2(a)は地中根形態樹木の被害(倒伏または破壊)発生

と各実測値の関係、(b)は気根形態樹木の被害発生と各実測値の関係である。図中、○は樹木に被害が無い場合、×は各々有りの場合を示す。(a)より、地中根形態においては H の増加に従って樹木に被害が発生する傾向にあることは確認できるが、他の実測値との関係性を読み取することは難しい。(b)より、気根形態ではサンプル数は少ないものの、 H や dn の増加に従って樹木に被害が発生する傾向にあることが判る。表-1は各実測値の偏相関係数である。各実測値相互の偏相関係数はおおむね0.5以下であり、互いの関連性は低い。一方、樹木倒伏や破壊に対する各実測値の相関は異なり、倒伏と dn は正の相関であるが、破壊と dn は負の相関となる傾向にある。

3. 沿岸林内樹木の被害に関する統計モデル

(1) ロジスティック回帰モデル

本研究で用いる確率分布モデルはシグモイド型のモデルを適用することにし、シグモイド型の関係を線形化することができるlogit変換(岡田ら、2004)を利用する。式(1)、(2)にその式型を示す。

$$P = 1 / (1 + e^{-\Phi}) \quad (1)$$

$$\Phi = \beta_0 + \beta_1 \chi_1 + \beta_2 \chi_2 + \cdots + \beta_i \chi_i \quad (2)$$

ここで、 P は(被害等の)発生確率、 χ_i はその現象を説明するために観測された変数群、 β_i は回帰係数であり各変数のオッズ比(相対危険度)の自然対数をとったものと解釈される。

なお、本統計モデルでは沿岸林内樹木の被害や破壊をその有無でのみ2値化して評価しているため、沿岸林内樹木の量的な被害数は議論できない。よって、量的な被害数の評価は陸上氾濫を含む詳細な津波数値解析に頼らざるを得ない。

(2) 沿岸林内樹木の倒伏発生に関する解析結果

ロジスティック回帰モデルに基づいた、沿岸林内樹木の倒伏発生率に関する解析結果を表-2に示す。倒伏被害については樹木の破壊が生じている実測サンプルは除外し

表-2 沿岸林内樹木の倒伏発生率に関する解析結果

Lodging	N	Odds Ratio				Hitting Ratio	AIC
		Type of root	d (m)	dn (m)	H (m)		
Model-L1	84		0.03		1.31	0.78 (1.00 / 0.26)	97.09
Model-L2	60			1.29	1.20	0.80 (0.97 / 0.23)	71.70
Model-L3	84	2.48	0.01		1.46	0.79 (0.98 / 0.30)	97.55
Model-L4	60	0.81		1.31	1.17	0.73 (0.97 / 0.24)	73.26
Model-L5	60	1.86	0.01	1.42	1.41	0.80 (0.93 / 0.47)	64.83

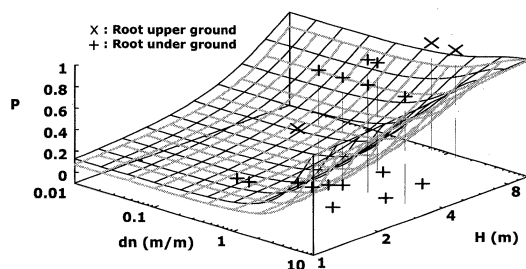
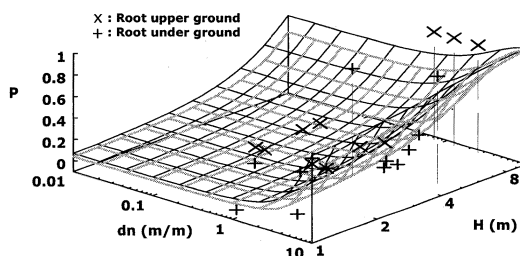
(a) Model-L5, $d=0.05\text{m}$ (b) Model-L5, $d=0.2\text{m}$

図-3 沿岸林内樹木の倒伏発生率分布

て解析を行った。Model-L1は d と H ，Model-L2は dn と H ，Model-L3は根形態と d 及び H ，Model-L4は根形態と dn 及び H ，Model-L5は全ての実測値を用いた場合の解析結果である。表中， N は実測値のサンプル数，AICは赤池情報量基準(赤池，2007)である。的中割合について，括弧内は倒伏無し／倒伏有りの的中割合を示し，各モデルでの的中基準は発生率 $P < 0.5$ で倒伏被害無し， $P \geq 0.5$ で倒伏被害有りとして定義した。

表から，沿岸林内樹木の倒伏発生率に関する各実測値のオッズ比より，気根形態より地中根形態の方が樹木倒伏の発生危険度は同等か2倍程度であることが判る。柳澤ら(2006)のインド洋地震津波における事例研究によると，*Rhizophora*種の多くは倒伏や被害は少なく，支持根(樹幹部)で破断しているのが多い。本解析の傾向はこれらの事実と整合する。また， d が小さくなるにつれ倒伏の危険度が上がる傾向にある。一般的に， d が小さくなるにつれ倒伏耐力も小さくなるため(今井・鈴木，2005)，この解析結果に矛盾はないと考えられる。一方で， dn が増加するに従って樹木倒伏の発生危険度は増大する傾向にある。これは dn の増加により，津波氾濫流は堰上げられ(今井，2008)，根に作用する倒伏モーメントが増大するためと考えられる。もちろん， H の増大により倒伏発生危険度も高まる。本解析条件における沿岸林内樹木の倒伏発生率に関する最適な統計モデルとしては，AICによる基準的中割合からModel-L5と判断した。式(3)にModel-L5における Φ を示す。

$\Phi = -2.66 - 4.43d + 0.35dn + 0.34H + 0.62TOR$ (3)
ただし，式(3)の適用範囲は，

$$0.02\text{m} < d < 1.5\text{m}, 0.1 < dn < 7.5, 1\text{m} < H < 9\text{m}$$

となる。ここで， dn の単位系はm/mである。

図-3(a)，(b)に沿岸林内樹木の倒伏発生率分布を示す。図中，黒実線は地中根形態，灰色実線は気根形態の場合の確率分布を示し，+は地中根形態，×は気根形態の実測値を示す。(a)においては $d=0.05\text{m}$ とした確率分布平面を示し，実測値は $d=0.01\text{m} \sim 0.1\text{m}$ のサンプルをプロットしたもの，(b)においては $d=0.2\text{m}$ とした確率分布平面を示し，実測値は $d=0.1\text{m} \sim 0.4\text{m}$ のサンプルをプロットしたものである。図から， H が増大するに従い倒伏発生率は高まるのはもちろんのこと， dn が大きいかほど倒伏発生率は高まる傾向にあることが判る。また，気根形態の方が地中根形態よりも倒伏発生率は低下する傾向にある。(a)，(b)の比較から， d が小さいほど倒伏発生率が高まる傾向となることが判る。

(3) 沿岸林内樹木の破壊発生に関する解析結果

沿岸林内樹木の破壊発生率に関する解析結果を表-3に示す。表中の定義は表-2と同様である。解析モデルについて，Model-D1は d と H ，Model-D2は dn と H ，Model-D3は根形態と d 及び H ，Model-D4は根形態と dn 及び H ，Model-D5は全ての実測値を用いた場合の解析結果である。表から，沿岸林内樹木の破壊発生率に関する各実測値のオッズ比より，根形態の影響は大きく，気根形態より地中根形態の方が樹木破壊の発生危険度は3倍程度かそれ以上となることが判る。また， d が小さくなるにつれ破壊の危険度が上がる。これは d が小さくなることによる剛性の低下が起因していると考えられる。一方で， dn は樹木倒伏発生率の結果と逆傾向を示し， dn が減少する

表-3 沿岸林内樹木の破壊発生率に関する解析結果

Destruction	N	Odds Ratio				Hitting Ratio	AIC
		Type of root	d (m)	dn (m)	H (m)		
Model-D1	105		0.46		1.99	0.80 (0.89 / 0.40)	70.97
Model-D2	77			0.33	1.98	0.81 (0.93 / 0.37)	53.02
Model-D3	105	4.14	0.21		2.34	0.86 (0.97 / 0.35)	62.31
Model-D4	77	3.22		0.29	2.17	0.86 (0.95 / 0.50)	47.82
Model-D5	77	3.31	0.82	0.29	2.18	0.86 (0.95 / 0.50)	49.73

の関数型を示す。

$$\Phi = -5.14 - 1.25dn + 0.77H + 1.177TOR \quad (4)$$

ただし、式(4)の適用範囲は、

$$0.1 < dn < 7.5, \quad 1\text{m} < H < 15\text{m}$$

である。図-4に沿岸林内樹木の破壊発生率分布を示す。図中の定義は図-3と同様である。Hが増大するに従い、破壊発生率が高まるのはもちろんのこと、dnが小さいほど破壊発生率は高まることが判る。また、気根形態の方が地中根形態よりも破壊発生率は低下する傾向にあることが判る。

4. 統計モデルを利用した沿岸林内樹木の被害推定

1983年日本海中部地震津波では峰浜海岸や能代海岸における沿岸林内樹木に倒伏等の被害が確認されている(土木学会編集, 1986)。本研究で開発した沿岸林内樹木の被害に関する統計モデルの妥当性を検討するために、日本海中部地震の津波数値解析を行い、その津波高分布と開発した統計モデルより、樹木被害の発生率分布を算出する。図-5に計算領域及び津波初期波源を示す。津波の伝播計算には従来のモデル(後藤・小川, 1982)を用い、計算領域は空間格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 270\text{m}$ 、 $\Delta t = 0.9\text{s}$ とし、汀線には鉛直壁を設置した。津波波源は相田のモデル(佐藤ら, 1989)を用い、Mansinha and Smylieの理論(1971)により求めた。沿岸林内樹木の被害に関する統計モデルについて、倒伏発生確率の算定には式(1)、(3)を用い、破壊発生確率には式(1)、(4)を用いた。沿岸林条件としては、沿岸林前縁の地盤高は一律に $h_{gr} = 4.0\text{m}$ 、 $d = 0.102\text{m}$ とし、 $dn = 1.0 \sim 3.0\text{m/m}$ に変化させた。Hについては、氾濫計算は行わないため最大津波高から h_{gr} を差し引くことで評価した。

図-6に秋田県沿岸の最大津波高分布と沿岸林内樹木の倒伏、破壊被害発生率を示す。倒伏発生率についてはdnにより変化し、八竜沿岸では倒伏発生率は最大で40%程度であるが、能代海岸や峰浜海岸では60%以上となる。破壊発生率については八竜岸や能代海岸では数%とその発生確率は低い。しかし、峰浜海岸では津波高が高くなるため $dn = 1.0\text{m/m}$ の場合のみ、破壊発生率30%となる。実際には津波流体力だけでなく、漂流物衝突による樹木倒伏や破壊の場合もあり、加えて沿岸林前縁の地盤高には地域性があるため、決定論的に議論するためには不十

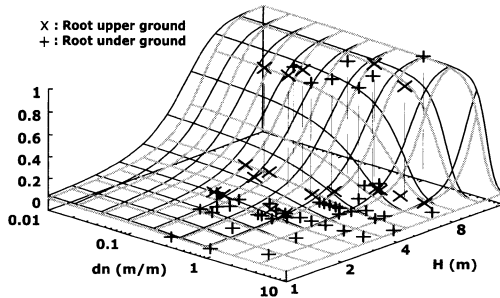


図-4 沿岸林内樹木の破壊発生率分布(Model-D4)

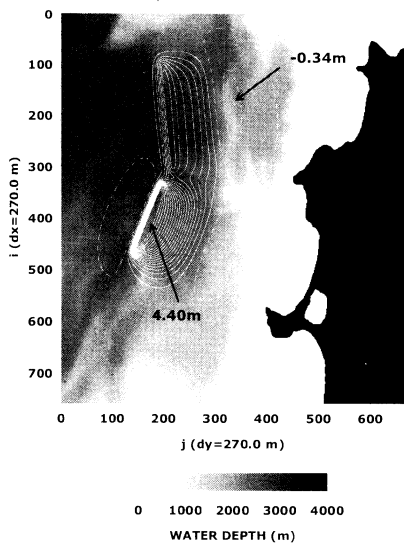


図-5 計算領域と初期波形
(コンター間隔0.2m 実線：隆起、破線：沈降)

に従って樹木の破壊発生危険度は増大する傾向にある。破壊に関する物理量としては氾濫流速が重要であり、同じ津波氾濫流を想定した場合、dnの大きい方が氾濫流速は減じられる(今井, 2008)。ゆえにこのような傾向となったと考えられる。Hについては、浸水深が高くなることにより外力が増大するため破壊発生率が大きくなることも理解できる。

本解析条件における沿岸林内樹木の破壊発生に関する最適統計モデルについて、AICによる基準的中割合からModel-D4と判断した。式(4)にModel-D4におけるΦ

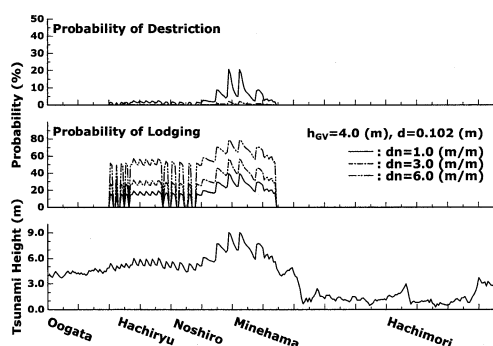


図-6 秋田県沿岸の最大津波高分布と沿岸林内樹木の倒伏、破壊被害発生率

分であるが、本研究による統計モデルは沿岸林内樹木の被害発生に関する簡便な評価指標として有効となる可能性を示している。

5. おわりに

過去の津波事例における沿岸林内の樹木被害に関する実測データに基づいた統計解析から、樹木被害に寄与する影響因子の抽出を行い、実測値に基づく統計モデルを開発した。本研究で得られた主な結論を示す。

①本解析条件において、根形態により被害発生の危険度は変化し、気根形態に比べ地中根形態は2~3倍程度被害発生の危険度は高まることを示した。また、樹木の胸高直径は小さいほど、その発生危険度は高まる。一方で、植生厚みについては、被害形態によりその傾向が異なり、倒伏被害は植生厚みが大きくなることにより発生危険度は高まり、破壊被害は植生厚みが小さくなることにより発生危険度は高まる。

②本解析条件における樹木被害に関する統計モデルについて、倒伏被害発生率については津波浸水深、根形態、胸高直径、植生厚みを用いたモデルが実測値を良く説明する。破壊被害発生率については津波浸水深、根形態、植生厚みを用いたモデルが実測値を良く説明する。

③決定論的に議論するためには不十分であるが、比較的大きい空間格子間隔での津波数値解析による最大津波高分布と本研究で開発した統計モデルにより、沿岸林内樹木の被害発生に関する評価指標を与え得る可能性を示した。

今後の課題としては、さらなる実測値の収集はもちろんのこと、2004年インド洋大津波のような、樹木の被害

が顕著であった事例に適用し、本統計モデルの適用性を確認する必要があると考えられる。また、樹種により樹冠部の形状も大きく異なるため、本モデルの精度向上にはこれらの影響も考慮していく必要があると考えられる。

謝辞： 本研究遂行にあたり、埼玉大学工学部田中規夫教授からは2004年インド洋津波における沿岸林被害に関する貴重なデータの提供を受けました。秋田大学工学資源学部附属地域防災力研究センター松富英夫教授からは多くの意見を賜り、さらに2007年ソロモン諸島津波における沿岸林データの提供を受けました。秋田大学工学資源学部浜岡秀勝准教授には統計解析手法について、多くの意見を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 赤池弘次・甘利俊一・北川源四郎・樺島祥介・下平英寿：(2005)：赤池情報量基準AIC，共立出版，pp.56-61.
- 今井健太郎：(2008)：沿岸植生域を氾濫する津波の水理学的研究，秋田大学博士学位論文，pp.55-75.
- 今井健太郎・鈴木明菜(2005)：沿岸樹木のパイプモデルを用いた表面積，体積評価法とその倒伏耐力，水工学論文集，第49巻，pp.306-310.
- 今井健太郎・松富英夫(2005)：沿岸林による津波減勢効果とその限界に関する判定図の作成，平成17年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，pp.250-251.
- 岡田昌史編集(2004)：The R Book，九天社，pp.283-289.
- 後藤智明・小川由信(1982)：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学土木工学科，52p.
- 佐藤良輔・岡田義光・鈴木保典・阿部勝征・島崎邦彦(1989)：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版会，p.358.
- 首藤伸夫(1985)：防潮林の津波に対する効果と限界—過去の事例による判定—，津波防災実験所研究報告，第2号，pp.1-38.
- 田中規夫・佐々木寧・湯谷賢太郎，Samang Homchuen(2005)：津波防御に対する樹林幅と樹種影響について—インド洋大津波におけるタイでの痕跡調査結果—，海岸工学論文集，第52巻，pp.1346-1350.
- 土木学会編集(1986)：1983年日本海中部地震震害調査報告書，土木学会，pp.1346-1350.
- 柳澤英明・越村俊一・後藤和久・今村文彦・宮城豊彦・林一成(2006)：マングローブ林内を遡上した津波の挙動と樹木の破壊条件—2004年インド洋大津波によるタイKhao Lakでの被害調査—，海岸工学論文集，第53巻，pp.231-235.
- Mansinha, L. and Smylie, D. E. (1971)：The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.
- Matsutomi, H., Fujima, K. and Shigihara, Y. (2007)：Earthquake and Tsunami Disaster in Solomon Island, 2 April 2007, <http://www.ja-ee.gr.jp/research/res05/sol2007.pdf>.