

実地形における海岸林を利用した津波減勢策 - 仙台湾岩沼・名取海岸を例として -

Tsunami Hazard Mitigation by Using Coastal Forest in a Practical Field - Case Study of Iwanuma-Natori Coast in Sendai Bay -

今井健太郎¹・原田賢治²・渡辺 修³・江刺拓司³・高貫直樹³・八木智義³・今村文彦⁴

Kentaro IMAI, Kenji HARADA, Osamu WATANABE, Takuji ESASHI, Naoki SHIMANUKI
Tomonori YAGI and Fumihiko IMAMURA

The purpose of this study is to discuss design of mitigation by using coastal forest in a practical field, and to evaluate the role and effect of coastal forest. In this study, Iwanuma-Natori coast in Sendai Bay was selected as the research site. The field investigation was carried out to measure the topography inside of coastal forest and the forest condition. To evaluate the effect of coastal forest, one-dimensional numerical simulation was carried out based on the field investigation. And the effect of several plan of countermeasure including the afforestation of forest and the stabilized dune was examined and discussed for implementation in the field.

1. はじめに

海岸林による津波減勢策は海岸防護施設整備の不十分な途上国では有効な手段となり(例えば, 柳澤ら, 2006), 日本においても既設臨海構造物との連携により津波防災機能強化につながると考えられる。

仙台湾沿岸では, 西暦1600年頃から地域づくりの一環, そして, 過去の災害を教訓に海岸林が整備され現在に至っている。現在, この地域では空港関連施設, 交通インフラ, レクリエーション, 農地や住宅地など, 多彩な土地利用がなされている。一方で, 当該地域は発生時期が切迫している宮城沖地震による津波の陸上氾濫が懸念されている。仙台湾沿岸65km延長のうち, 16km区間では防潮堤が未整備であり, 名取川と阿武隈川の間位置する岩沼・名取海岸には重要公共施設が存在するにも関わらず, 防潮堤の未整備区間が存在するため, 本地域における津波防災・減災機能の強化は急務である。

本研究は, 仙台湾岩沼・名取海岸を対象とし, 海岸林の現況と実際の地形把握のために現地調査を行い, 実際の標高値及び海岸林諸元を用いた1次元の津波氾濫計算から, 現況海岸林での津波減勢機能を評価する。そして, 海岸林による効果的な津波減勢機能強化手法の提案を行い, その定量的な機能評価を目的としている。



図-1 調査測線の位置 (Google Earth に加筆)

2. 現地調査

仙台空港海側に位置する海岸林の現況把握および微地形測量のため, 現地調査を行った。調査を行った測線を図-1に示す。海岸林と貞山運河の間では住宅地等, 様々な形態で土地利用がなされており, 貞山運河より内陸部に仙台空港が位置する。以上を踏まえ, 調査測線は土地利用形態や海岸林の立木密度や樹高などの特性が異なる3測線を設定した。

(1) 各測線の縦断測量結果

仙台空港海側に位置する海岸林において, 海岸林の密度や樹高などの特性が異なる3本の測線を設定し, 北からLine1, Line2, Line3とした。これらの各測線において, 汀線から内陸に向けて海岸林内のレベル測量を行い, 海浜および海岸林内の微地形の状況を把握した。測線の測量結果を図-2に示す。横軸は汀線からの距離を, 縦軸は標高を示している。測量点および測量区外の岩沼・名取海岸における都市計画地図(名取市, 縮尺1/2500)の

1 正会員 博(工) 東京大学特任研究員大学院情報学環/地震研究所
2 正会員 博(工) 埼玉大学助教大学院理工学研究科
3 宮城県農林水産部森林整備課
4 正会員 工博 東北大学教授大学院工学研究科災害制御研究センター

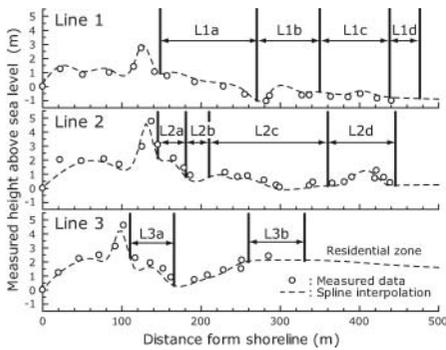


図-2 各側線の縦断測量による標高値と海岸林分布区間

表-1 海岸林の諸元

Line	The present time				15 years past			
	d_c (m)	H_T (m)	H_{TR} (m)	N_U (1/m ²)	d_c (m)	H_T (m)	H_{TR} (m)	N_U (1/m ²)
L1a	0.06	3.5	1.0	0.76	0.09	6.0	1.5	0.30
L1b	0.09	6.0	2.5	0.25	0.12	8.0	2.5	0.25
L1c	0.09	6.0	2.5	0.48	0.12	8.0	2.5	0.30
L1d	0.08	6.0	2.5	0.65	0.11	8.0	2.5	0.30
L2a	0.05	3.5	0.2	0.62	0.08	6.0	1.0	0.60
L2b	0.13	7.0	1.0	0.23	0.16	10.5	1.8	0.23
L2c	0.14	9.4	4.3	0.29	0.17	12.2	4.3	0.29
L2d	0.07	9.5	2.5	0.96	0.11	12.3	2.5	0.30
L3a	0.13	9.5	4.0	0.31	0.16	10.5	4.0	0.31
L3b	0.19	14.0	5.5	0.16	0.22	15.0	5.5	0.16

標高値を用いてスプライン補間を行い、5m間隔に修正した標高(破線)もあわせて示している。

各測線において、汀線(図中、0m地点)から100~120mの内陸部に標高4~4.6mの小山があることが確認できる。この小山は、Line1, 2においては砂丘固定工を意味し、Line3においては、防潮堤を意味している。現況では、海岸林はこれらの砂丘固定工および防潮堤の内陸側に分布している。海岸林内における地形は、部分的に凹凸を持っているが、汀線から約1kmにある真山堀に向かって緩やかに標高が下がって行く傾向にある。

(2) 海岸林の現況調査

各測線において、海岸林の育成状況の調査を行った。海岸林を構成する樹種はほとんどがクロマツであり、まれにニセアカシアが見られた。また、海岸林の造林時期や生育状況が岸沖方向に異なって分布していたため、調査区域をLine1, 2は4カ所、Line3は2カ所に分けて評価した。各側線において分類した区間を図-2に示す。表-1に、各区間における海岸林の諸元を示す。表中、 d_c は平均胸高直径(m)、 H_T は代表樹高(m)、 H_{TR} は代表枝下高(m)、 N_U は立木本数(1/m²)を示している。なお、原田・河田(2005)の管理下での海岸林の生長基準を用い、15年後の海岸林諸元も併記してある。

Line1について、最も海に近いL1aの調査区域の樹木は、Line1の他と比べ H_T は3.5mと低く、 d_c は0.059mと小さく、 N_U は0.76本/m²と密集している。これは、この地域にお

いて以前火災があり、焼失した区域に植林を行ったためである。L1b, L1c, L1dについては、 d_c , H_T , H_{TR} には大きな違いが無いが、 N_U が汀線から離れるに従い大きくなる傾向がみられた。

Line2について、最も海に近いL2aの調査区域の樹木は H_T が低く、 d_c が小さく、 N_U が高く密集しているが、その区間距離は短い。L2b, L2cでの d_c は0.1mを越え、 H_T は7~9mを越える太く背の高い樹木の区間となっている。L2dの区間では d_c は細いが H_T は9.5mと高く、 N_U は0.96本/m²と密集している区間となっている。

Line3について、海に近いL3aの調査区域でも d_c は13cm、 H_T は9.5mと大きく成長した樹木となっている。L3bの調査区域は少し標高が高くなっており、さらに大きな樹木がまばらに分布している。これは樹齢も古く、伊達の時代のものもある。なお、L3aとL3bの間は乗馬場として利用されているため裸地となっており、L3bから真山堀までは住宅地として利用されている。この測線は海から内陸へ向けての海岸林の幅が狭く、住宅地が海に近いため防潮堤が設置されている特徴がある。

3. 津波数値解析

(1) 想定した地震津波と入力波形

現地調査から得られた標高データを用いた1次元の氾濫計算を行うための津波入力波形を得るために、後藤・小川(1982)の方法を用いて平面2次元の津波数値計算を行った。格子間隔は2025.0m、時間間隔は1.0sとした。計算領域は東経約138.7°~約147.5°、北緯約34.7°~約44.0°とした。

対象とした地震津波は、宮城県沖における有史以来既往最大の地震として、869年貞観地震モデル(佐竹ほか, 2008)と、想定宮城沖地震(宮城県, 参照2009-3-7)を仙台湾に津波が集中するように震源域B(図中の一点鎖線)をB'の位置移動させた変更宮城沖地震モデルを対象とした。表-2に対象とした各地震モデルの断層パラメータを、図-3に各地震モデルの津波初期波源を示す。津波の初期波源はMansinha・Smylie(1971)の方法により計算した。なお、想定宮城沖地震(単独型)、想定宮城沖地震(連動型)による津波は砂丘固定工から内陸へ浸水せず、海岸林による津波減勢効果が確認できなかったため、本稿では取り扱わなかった。

1次元氾濫計算を行うための津波波形は図-3中の出力点(図中の●)における津波の時刻歴を用いた。この出力波形を断面1次元計算の境界入力波形とした。

(2) 海岸林域を氾濫する津波の1次元解析手法

海岸林を氾濫する津波の1次元氾濫計算は今井・松富(2006)の方法を用いた。空間格子間隔は5.0m、時間間隔は0.025sとし、樹木の抗力係数は1.0、質量係数は2.0とし

表-2 各地震モデルの断層パラメータ

Fault model	Fault location		L (km)	W (km)	D (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Slip (m)	
	Lat. (N)	Lon. (E)								
Mod. Miyagi-oki	A1	38.41°	142.49°	36	64	26	200°	21°	90°	3.5
	A2	38.20°	142.39°	40	36	26	200°	21°	90°	3.5
	B'	38.26°	143.26°	133	49	14	204°	12°	90°	5.6
Jyogan		38.24°	143.41°	200	100	15	202°	18°	90°	7.0

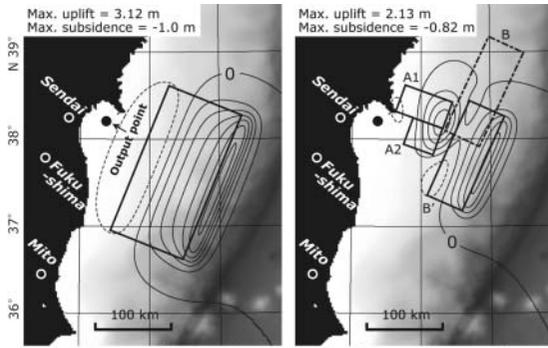


図-3 各地震モデルの津波初期波源
(コンター間隔: 0.5 m, 隆起: 実線, 沈降: 破線)

た. 海岸林の樹木体積, 表面積等は今井・鈴木 (2005) の方法を用いて評価した. 海域及び家屋など構造物のない陸域では Manning 粗度係数を用い, おのおの 0.025, 0.03m^{-1/3}s とした. 住宅等, 構造物の抵抗は合成等価粗度係数 (油屋・今村, 2002) を用いて評価した.

4. 1次元津波氾濫解析による海岸林を用いた津波減災機能強化の評価

海岸林による津波減勢効果が顕著に生じた貞観地震モデルを対象として検討を行う. 検討する津波減災機能強化について, C-1は海岸林無し, C-2は現況海岸林, C-3は裸地区域への造林, C-4は砂丘固定工法面への造林と防風柵の設置 (後述), C-5はC-3とC-4の複合策, C-6は砂丘固定工天端高嵩上げ, C-7はC-3からC-6の複合策とした. なお, 本研究で想定した地震モデルによる津波では, いずれも海岸林に倒伏被害 (今井・鈴木, 2005) は生じなかった. 対象海岸には砂丘固定工が整備されており, これにより津波波力・流体力が低減されたためと考えられる. また, 現況と15年後の樹木生長を考慮した海岸林条件による浸水状況にはほとんど違いがみられなかった.

(1) 現況海岸林 (C-2)

図-4に, 各測線における最大浸水深分布を示す. 砂丘固定工や防潮堤天端付近で限界流が生じていること, 海岸林域では無い場合に比べて浸水深が増加していることや, 海岸林の有りに無しに関わらず, 氾濫流は土地利用区域に侵入し, 空港まで達していることがわかる.

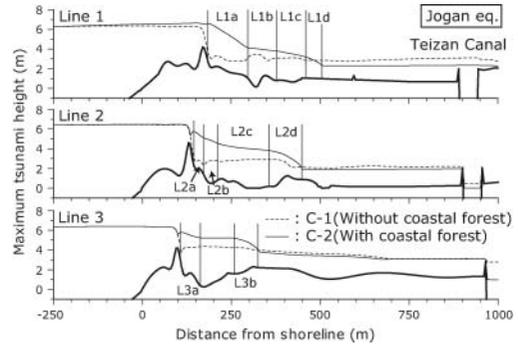


図-4 海岸林の有無による各測線の最大浸水深分布変化

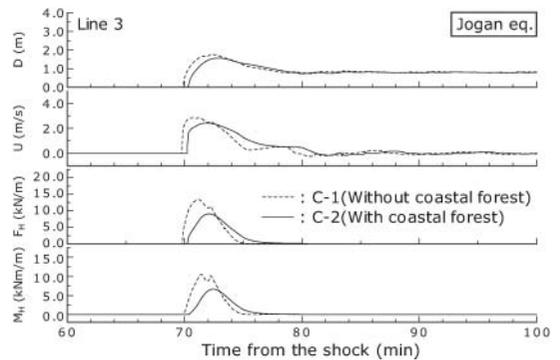


図-5 Line 3における海岸林背後での浸水深, 流速, 流体力とモーメントの時刻歴変化

図-5はLine3における海岸林背後 (内陸320m地点) における氾濫流の単位幅 (1.0m) に作用する流体力 $F_H (= \rho D U^2)$, ρ : 水の密度, D : 浸水深, U : 流速) と転倒モーメント $M_H (= 0.5 \rho D^2 U^2)$ の時刻歴である. 図から, 海岸林により氾濫伝播速度は遅延すること, 浸水深や流速も減ることがわかる. 流体力は30%程度, 転倒モーメントは50%程度減ずることがわかる. 浸水域について, Line1では海岸林の有無に関わらず貞山堀を越えるが, Line2, 3では海岸林により貞山堀で食い止められている. ゆえに, 現況海岸林の長期的な維持が重要となる.

(2) 裸地区域への造林 (C-3)

用地確保の問題など, 現実的には難しいと考えられるが, Line3における裸地区域への造林による津波減勢効果評価を行った. 海岸林条件は造林後15年とし, 表-1の値を用いた. 造林箇所は海岸林条件としては, 現況のL2aにおける海岸林諸元を用いた.

裸地区域造林による最大浸水深分布の変化を図-6に示す. 裸地区域造林により, 海岸林内陸の住宅地の浸水深は若干減少していることが確認できる. しかし, 効果的な機能強化とは必ずしもいえない.

(3) 砂丘固定工法面への造林と防風柵 (C-4)

砂丘固定工法面へ造林を行い, 幼樹の生長保護のために造林域海側前面に丸太防風柵 (直径0.07m, 長さ2mの

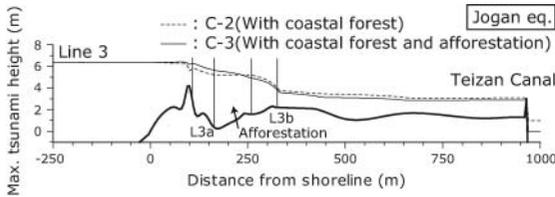


図-6 裸地区域造林による最大浸水深分布の変化

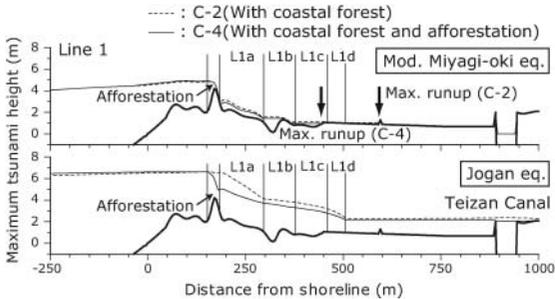


図-7 Line 1における砂丘固定工法面への造林による最大浸水深分布の変化

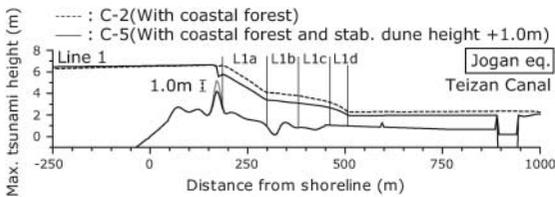


図-8 砂丘固定工天端高を1.0m嵩上げした場合の最大浸水深分布の変化

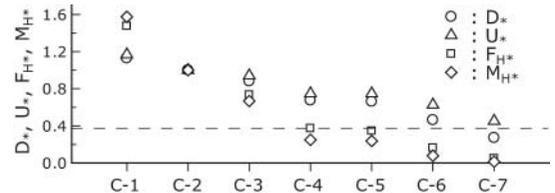


図-9 各津波減勢機能強化策に応じた最大浸水深、最大流速、最大流体力、最大転倒モーメントの変化

丸太を沿岸方向1mあたり13本抱え合わせた群杭)を設置し、15年経過した場合についての津波減勢機能評価を行った。造林区間の海岸林条件は裸地区域への造林と同様に、L2aの条件を用いている。

図-7にLine1における砂丘固定工法面への造林による最大浸水深分布の変化を示す。図中、上段は変更宮城沖地震モデル、下段は貞観地震モデルを示す。図から、地震モデルに因らず、最大浸水深は顕著な減少が確認できる。これは、砂丘固定工の天端付近で形成される限界流の発生位置より海側で造林された樹木と防風柵が津波に対する流体抵抗となり、内陸に流入する津波氾濫流を著しく減少させたためと考えられる。また、変更宮城沖地

震モデルによる津波は砂丘固定工法面への造林と防風柵により遡上距離が150m程度減少し、Line1においては土地利用区域への浸水が免れる。

(4) 砂丘固定工の嵩上げ (C-6)

砂丘固定工の天端高の嵩上げを行うことによる津波減勢機能の評価を行った。

図-8にLine1における砂丘固定工の天端高を1.0m嵩上げた場合の最大浸水深分布の変化を示す。津波氾濫流は砂丘固定工により反射し陸域への流入量も減少するため、浸水域は嵩上げ前と変わらず貞山堀まで達するが、最大浸水深は現況に比して顕著に減少することがわかる。また、図-7との比較から、最大浸水深については砂丘固定工法面への造林と防風柵による津波減勢機能強化法は砂丘固定工の天端高の嵩上げと同程度の効果があることがわかる。

(5) 各津波減勢機能強化策による津波減勢効果

図-9に各津波減勢機能強化策に応じた海岸林背後における最大浸水深 D^* 、最大流速 U^* 、最大流体力 F_{H^*} 、最大モーメント M_{H^*} の変化を示す。各値は各測線における平均値であるが、C-3はLine3のみの評価である。図中、現状(C-2)における各最大水理量で規格化している。図から、海岸林管理の重要性(C-1との比較)や事業レベルに応じた減勢効果の程度がわかる。例えば、砂丘固定工法面の造林(C-4)により、最大浸水深や流速は20%程度低減し、最大流体力やモーメントは50%以上低減することがわかる。図中の破線は成人男性が自立可能な津波流体力(漂流物は含まない)に対する安全領域上限値(伊東ら、2006)である。人的被害の軽減という観点からも、海岸林を利用した津波減勢事業は有効であることがわかる。

表-3に各津波減勢機能強化策による効果の一覧を示す。図中、□は考慮した強化策を示し、海岸林背後地の水理量については、×は低減効果無し、△は低減効果多少有り(低減効果15%未満)、○は低減効果有り(低減効果30%程度)、◎は低減効果有り(低減効果50%以上)を示す。氾濫域については、×は貞山堀を越えて氾濫する場合、△は貞山堀まで氾濫する場合、○は海岸林域まで氾濫する場合、◎は海岸林域より海側まで氾濫の場合である。この表の結果により、対象とする地震を選び、津波減勢目標を設定することで、どの機能強化策を選択すればよいか判断できる。最終的には事業実施上の課題である用地の入手しやすさ、事業費の規模などを考慮して、総合的に評価する必要がある。

5. おわりに

仙台湾岩沼・名取海岸を対象とし、海岸林による効果的な津波減勢機能強化手法を検討した。現況の海岸林に

表-3 各津波減災機能強化策による効果の一覧

Case	Forest Condition	Afforestation		Stabilized dune height	Effect of disaster prevention							
		Not forested area	Stabilized dune		Jyogan earthquake				Mod. Miyagi-oki eq.			
					D	U	F _H	Inundation area	D	U	F _H	Inundation area
C-1	Without coastal forest			Initial height	×	×	×	×	△	△	△	△
C-2	Current condition			Initial height	×	△	×	△	○	○	○	△
C-3	15 years past	□		Initial height	×	△	×	△	◎	◎	◎	△
C-4	15 years past		□	Initial height	○	○	○	△	◎	◎	◎	○
C-5	15 years past	□	□	Initial height	○	○	○	△	◎	◎	◎	○
C-6	Current condition			Initial height + 1.0 m	○	○	○	△	◎	◎	◎	◎
C-7	15 years past	□	□	Initial height + 1.0 m	◎	◎	◎	△	◎	◎	◎	◎

より、貞観地震モデルの津波に対しては、津波流勢緩和の効果が期待できる。変更宮城沖地震モデルの津波に対しては、現状の砂丘固定工と海岸林により、海岸林背後の土地利用区域は浸水するが、貞山堀より内陸への浸水は免れる。

海岸林を利用した津波減災機能強化策として、砂丘固定工法面へ造林と防風柵により、貞観地震モデルの津波に対しては海岸林背後の土地利用区域の浸水は免れないが津波の流勢や浸水深の低減が期待できることを示した。変更宮城沖地震モデルによる津波に対しては土地利用区域の浸水を免れることが可能となる。特に、砂丘固定工法面への造林は津波減勢効果に加え、砂丘固定工本体の強度増強にもつながり、地震動などによる崩壊対策となると考えられる。

当該地域において、砂丘固定工法面への造林と防風柵を用いた津波減災機能強化手法を用いることにより、同一延長における事業費試算はコンクリート製の防潮堤整備（本研究におけるC-6をコンクリート造とした場合に相当）の約13分の1となり、経済的な負荷が大幅に軽減されることを付記しておく。

謝辞：本研究遂行にあたり、東北学院大学教授松本秀明教授、宮城豊彦教授には多くの助言を賜りました。沿岸林現地調査遂行にあたり、宮城県農林水産部河野裕氏、渡邊力氏、佐藤鉄也氏、東電設計株式会社柳澤英明氏、東北大学大学院の学生諸氏からは多くの助力を賜りました。（独）産業総合技術研究センターから海底地形・標高データの提供を受けました。ここに記して、感謝の意

を表します。なお、本研究は宮城県が実施を計画している海岸防災林造成事業の実施にあたり、仙台湾沿岸保安林津波減災機能評価調査業務の成果をまとめたものである。また、科学研究補助金（代表：今村文彦、基盤研究(A):課題番号1820133）から一部補助を受けた。

参考文献

- 油屋貴子・今村文彦（2002）：合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの開発，海岸工学論文集，第49巻，pp.276-280.
- 伊東慎一・大町達夫・井上修作（2006）：歩行者に作用する津波力の定式化とスマトラ沖地震津波のビデオによる検証，海岸工学論文集，第53巻，pp.176-180.
- 今井健太郎・鈴木明葉（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（2006）：沿岸植生域を氾濫する津波の水理，土木学会論文集B，Vol.62，No.3，pp.258-269.
- 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.
- 佐竹健治・行谷佑一・山木 滋（2008）：石巻・仙台平野における869年貞観津波の数値シミュレーション，活断層・古地震研究報告，8，pp.71-89.
- 原田賢治・河田恵昭（2005）：津波減衰効果を目的とした海岸林活用条件の検討，海岸工学論文集，第52巻，pp.276-280.
- 宮城県：第三次地震被害想定調査報告書（オンライン），http://www.pref.miyagi.jp/kikitaisaku/jishin_chishiki/3higaishin/PDF/P2-1%E3%80%80被害地震.pdf，2009-6-30参照.
- 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 D. E. Smylie (1971) : The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.