

海岸林が有する津波減衰能力の定量的評価

Quantitative Evaluation on Tsunami Attenuation Ability of Coastal Forests

鹿児島大学理工学研究科 海洋土木工学専攻 教授 浅野敏之
鹿児島大学農学部生物環境学科 准教授 寺本行芳

(研究計画ないし研究手法の概略)

2011年の東北地方太平洋沖地震における海岸林による津波減衰効果の検証作業が続けられている。海岸林の活用は、防災と景観を両立させる魅力的な津波防災対策であり、林野庁による「みどりのきずな再生プロジェクト」など、津波によって流失した海岸防災林を復元するための植栽事業が宮城県などで進められている。海岸林を津波防災施設として活用する上で留意すべきことは、樹木群は生物体であるため時間(林齢)とともに樹高等の樹木形状や立木密度が変化し、それに伴って津波防災機能が変化する点にある。本研究は、新規に植栽された海岸林の林齢に伴う津波減衰効果の変化を数値計算によって検討したものである。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 海岸林と構成樹木の時間的生長の検討

(1) 樹木群の時間的成長のモデル化

海岸林の津波防潮能力の時間的変化を議論するためには、まず、林分の立木密度の時間的生長、ならびに林分を構成する樹木の樹高や胸高直径、幹・枝・葉の各部位の時間的生長についての、林学分野での知見を整理しておく。

土壌などの環境条件が一樣な土地に同じ樹種・寸法の幼木を一樣な状態で植えると、年とともに樹高や幹径が増加するとともに、自己間引きにより立木密度は疎になっていく。樹木の大きな生長要因は日光であり、樹木が森林内で生長し、隣り合う樹木と樹冠部が接すると日光を争奪する競争が始まる。遅れた成長をとった被圧木はさらに受光量が減少し(図-1)、それが累積して枯死する。立木密度 N の林齢 t による変化に関してはゴンペルツ型の成長曲線に基づいた箕輪(1983)の理論モデルがある(浅野・岩塚:2006)。

一方、樹高 h_{tree} や胸高直径 d_0 などの樹木個体の寸法も、立木密度 N に大きな制約を受けている。依田(1971)は自己間引きを起こしながら成長している林分の個々の樹木の重量 w は、肥料レベル、土地条件、生育時期などにかかわらず普遍的に

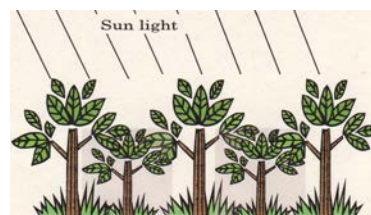


図-1 優勢木と被圧木の発生による自己間引き

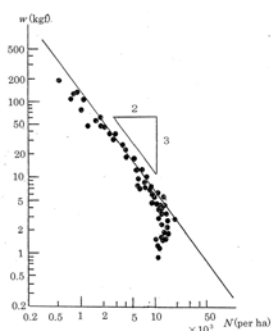


図-2 立木密度と樹木個体重の関係(依田、1971)

$$wN^{3/2} = \text{Const.} \quad (1)$$

の関係があることを見出している(図-2). 樹木の比重を一定とすると, (1)式は w を樹木体積 v で置き換えても成立し, v は樹高 h_{tree} と胸高直径 d_0 の2乗で概算評価できる. 樹木は樹種によって樹高と幹径, 幹と枝, 枝と葉について一定の比率(allometry)を持っていることを考慮すると,

$$v \propto d_0^3 \propto h_{tree}^3 \quad (2) \quad \text{となり,}$$

$$d_0 N^{1/2} = C_1, \quad h_{tree} N^{1/2} = C_2 \quad (3)$$

が導かれる(C_1, C_2 は定数である). 図-3はアカマツ天然林に対する林分平均胸高直径ならびに平均樹高と立木密度の関係についての吉良・依田(1957)の測定結果を用いて, 著者らが(3)式の回帰曲線を解析したものである. (3)式の定数は $C_1=0.06, C_2=5.6$ となった. 結果は対数軸上の勾配-1/2の直線の周辺に集まっており, (3)式が成立することを示している(依田, 1971). 以上の箕輪の理論による立木密度 N の林齢 t による変化, ならびに(3)式で $C_1=0.06$ としたときの胸高直径 d_0 の林齢 t による変化を図示すると図-4のようになる.

(2) 海岸林と樹木形状に関する計算条件の設定

海岸林の津波防潮能力の時間的変化を調べるために, 上記の森林生態学, 森林形態学の知見を踏まえて海岸林の計算条件の設定を行った. 林野庁が津波危険地域にある海岸林の林分内容の現地調査を行ったデータに基づいて(3)式の定数を検討した(林野庁, 2005). 使用したのは秋田県能代市の風の松原, 静岡県沼津市の千本松原, 宮崎県宮崎市の一ツ葉海岸のデータで, 10m×10mの調査区内の平均諸量を用いた. 図-5がその結果であり, 図-3と異なり勾配-1/2の傾向は鮮には認められずばらつきは大きい. ここで調べた海岸林の環境条件は, 図-3のような一様な自然純種林と異なるためと考えられる. また, 図-5(a)で図-3の胸高直径 d_0 についての回帰式はやや現地データより高めの値を与えており, 図-5(b)の樹高 h_{tree} のばらつきもおおきく, h_{tree} と N の回帰式は実測値よりかなり大きめの値となる. 図-6は枝下高(地表から最初の枝が分岐するまでの高さ) h_{br} と樹高 h_{tree} の比を示したもので, この結果はばらつきが少なく, 次式の関係が認められる.

$$h_{br} = 0.6h_{tree} \quad (4)$$

これは樹冠層が厚くなると光の透過を妨げ, 下層の葉の機能が不必要になり枝が自然に枯れ上がるため, 高い林分密度下での隣接樹木との枝張りの制限ともあいまって, 枝下高の生長に樹高や林分密

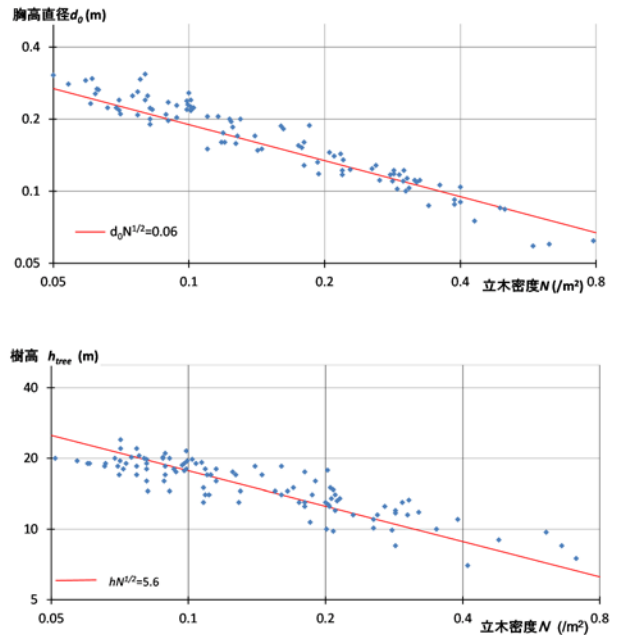


図-3 平均胸高直径・平均樹高と立木密度の測定結果(吉良・依田, 1957)を用いた再解析結果

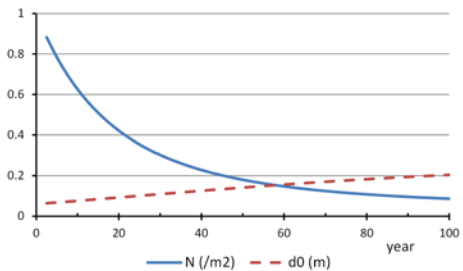


図-4 立木密度と胸高直径の経年変化

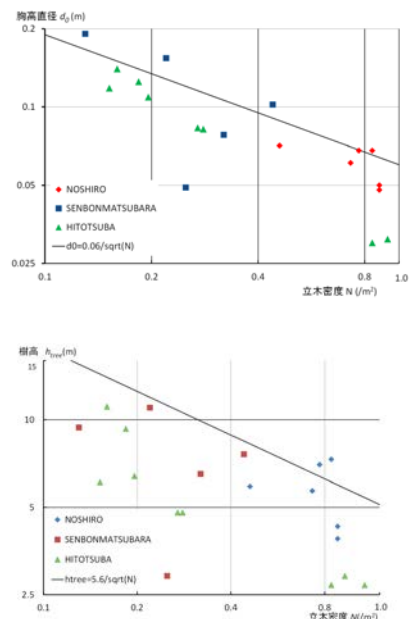


図-5 海岸林の平均胸高直径・平均樹高と立木密度の関係

度の強い制約がかかるからである。

数値計算では幼齢林として林齢 $\tau=10$ year, 壮齢林として $\tau=20$ year, $\tau=40$ yearの3ケースを設定した。まず, 林齢 τ による立木密度 N の変化については箕輪のモデルによった。次いで N から d_0 を図-3の $d_0 N^{1/2} = 0.06$ の関係から求めた。 h_{tree} については図-3の回帰式は図-5の実測結果を説明せず実測値のばらつきも大きいので, 小田(1984)の九十九里浜における海岸クロマツの調査結果をもとに林齢 $\tau=10$ year, $\tau=20$ year, $\tau=40$ yearに対して, それぞれ3.0m, 5.0m, 8.0mと設定した。 h_{br} は(4)式の関係から与えた。

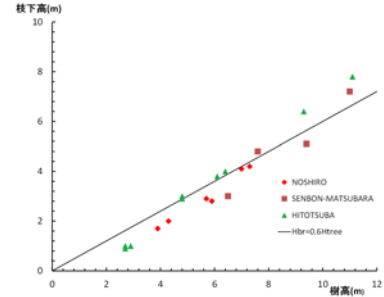


図-6 海岸林の枝下高と樹高の比

枝部, 葉部の樹木1本あたりの投影断面積 A_{br} , A_{lv} は, 野口ら(2012a)のクロマツの測定結果によれば枝下高直径 d_{br} のべき乗式で与えられる。

$$A_{br} = 32d_{br}^{1.7}, \quad A_{lv} = 813d_{br}^{2.4} \quad (5)$$

樹木の幹は上方に行くにつれ少し紡錘状に直径が減少するとされるが, ここでは $d_{br} \approx d_0$ として断面積を求めた。 A_{br} , A_{lv} の和に立木密度 N を乗じると, 単位面積あたりの枝葉総断面積 A^*_{total} が得られる。林齢 $\tau=10, 20, 40$ year に対するこれらの諸量を表-1にまとめた。枝下以下の幹部断面積を $A_{trunk} = h_{br} d_0$ とすると, 枝部の断面積は幹部の約2倍, 葉部の断面積は約10倍となることがわかる。津波水位と枝部・葉部の相対位置によって変化する流体抵抗を表現するために, 枝葉断面形状を地盤からの高さ z の関数として与える必要がある。ここでは簡単に枝下部を下底とし樹冠頂部を上底とする逆円錐台で表し, その投影面積が $A_{br} + A_{lv}$ となるよう, 樹冠部幅 w_{crown} を設定した。

2. 海岸林が繁茂する海浜上を遡上する津波の数値計算

基礎方程式は, 連続式と樹木群による流体抵抗力 F_{tree} を考慮した非線形浅水方程式である(原田ら, 2000)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M |M| + F_{tree} / \rho = 0 \quad (7)$$

ここに, $h = \eta + D$: 全水深(η : 静水面からの水位変動量, D : 静水深), M : 線流量, g : 重力加速度, ρ : 水の密度, n : Manningの底面粗度係数である。本計算では n は全領域を通じて0.025の一定値で与えた。単位底面積あたりの樹木群による流体力 F_{tree} は, 次式のように慣性項と抗力項で構成される。

$$F_{tree} = \rho C_M \hat{h} a_1 d_0^2 N \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\rho}{2} C_D \hat{h} a_2 d_0 N \frac{M |M|}{D^2} \quad (8)$$

ここに, C_D : 抗力係数, C_M : 質量係数である。 \hat{h} は, $\eta < h_{tree}$ で $\hat{h} = 1$, $\eta > h_{tree}$ で $\hat{h} = h_{tree} / \eta$ とする。樹木の占有体積, 投影面積は幹部分を基準とした $\hat{h} d_0^2 N$, $\hat{h} d_0 N$ に, (5)式で表される枝・葉部の体積, 面積を逆円錐台の樹冠形

表-1 海岸林の計算条件

τ (year)	N (m^{-2})	d_0 (m)	h_{tree} (m)	A_{trnk} (m^2)	A_{br} (m^2)	A_{lv} (m^2)	A^*_{total}
10	0.626	0.076	3.0	0.144	0.400	1.680	1.300
20	0.422	0.092	5.0	0.276	0.554	2.650	1.350
40	0.228	0.126	8.0	0.605	0.946	5.640	1.500

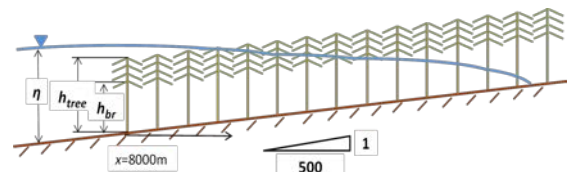
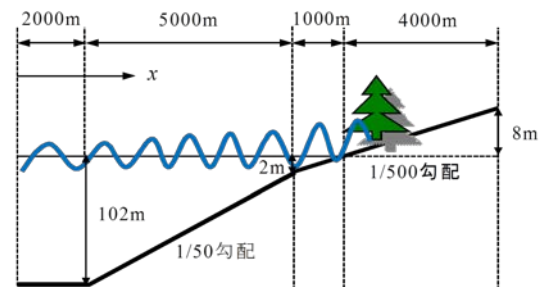


図-7 解析の地形条件

状を仮定して付加する。 a_1 , a_2 はそのときの係数であるが、図-7下図にみられるように、 η と h_{br} , h_{tree} との相対高さによって刻々と変化させて計算するようプログラミングされている。

林ら(2011) は、枝葉を有する小型の実樹木を一様流中に置き、抗力係数の流速に伴う変化を調べている。主流流速の増加とともに樹冠部の流れに対する投影面積が減少し換算抗力係数が低下することを示している。また野口ら(2012b)も実クロマツを用いた実験結果から、幹や枝に対して葉部の抗力係数は1/10程度に小さいことを報告している。こうした流れによる樹冠部の変形による見かけの抗力係数の低下は既往の研究で指摘されているが、今回の解析ではひとまず $C_D=1.0, C_M=2.0$ の一定値を用いることにした。

計算の対象とした地形は、図-7に示すように水深2mより沖側5000mは勾配1/50の斜面、水深2mより岸側ならびに陸上部が勾配1/500の斜面である。マツなどの海岸林は、波浪や強風、飛砂・飛塩の影響が少なくなった汀線から数100m程度のところから繁茂する。また現在進められている東北被災地の海岸防災林造成においても、基盤となる人工盛土と海岸林植栽の組み合わせとなっている。しかし、汀線から海岸林縁端までの距離や、盛土基盤などの地形条件を導入すると影響因子がさらに増えること、本研究の目的が林齢に伴う津波減衰能力の変化を理想化された状態で調べることにあるから、ここでは汀線が林縁となるという簡単な設定とした。

3. 計算結果ならびに考察

図-8は津波遡上波の水位変動の空間波形を示したものである。 $\tau=10$ yearでは自己間引きが進行していないため、密な立木密度 N が大きな流体抵抗を生むことになる。一方、 $\tau=20$ yearでは $\tau=10$ yearより胸高幹直径 d_0 が増加するが、 N が減少するため津波減衰効果が相殺し、全体として植栽後10年と20年で津波遡上範囲に大きな差が無い結果になった。一方、 $\tau=40$ yearでは d_0 は太くなるものの N の減少が大きく、また樹木個体の生長とともに枝下高が増加し津波水位が枝部・葉部に達せず幹部のみしか流体抵抗を形成しないことによって、図-8下図に見られるように津波遡上端は $x=10000$ m近くまで到達し、津波減衰能力が減少する結果となった。

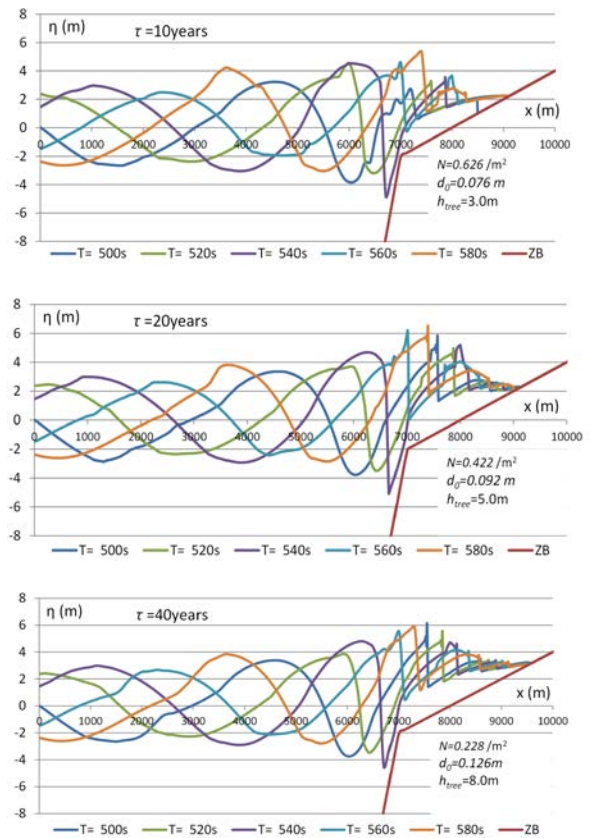


図-8 遡上波の水位変動波形

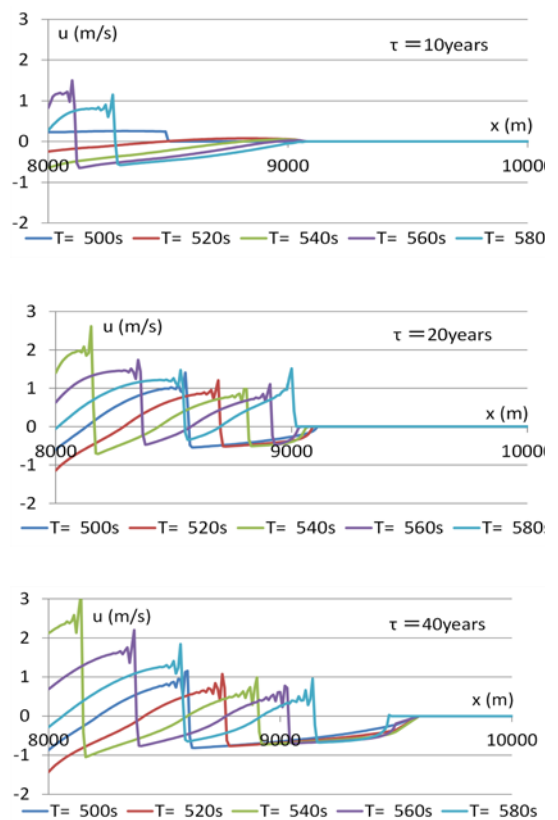


図-9 遡上波の水平流速

図-9は遡上波の水平流速の空間波形を $x=8000\text{m} \sim 10000\text{m}$ の範囲で示したものである。水平流速で表すと、 τ の増加とともに遡上域の流速が速くなり、林齢に伴う津波減衰効果の減少がより鮮明になることがわかる。樹木群に作用する流体力 F_{tree} は樹木の枝・葉形状を組み込んでおり地盤からの高さ z の関数となるが、これに z を乗じて積分すると、樹木の根回りの外力モーメントとなる。

$$M_{ext} = \int_b^n F_{tree}(z) z dz \quad (9)$$

ここに、 b は底面高である。図-10は津波が林内を伝搬する中で最大となる曲げモーメント値を外力の代表値とし、その空間分布が林齢とともにどのように変化するかを示したものである。この外力モーメントの結果には、林齢に伴う林分内通過流速の変化ならびに幹直径・樹高・枝下高の生長の両者が関与する。モーメント値が林縁からの距離によって屈曲した変化をするのは、この距離で津波の水位が枝下高や樹高を上回るためである。図から $\tau=10\text{year}$ と $\tau=20\text{year}$ では林縁からの距離によって大小関係が変化するが、林齢 $\tau=40\text{year}$ ではほぼ全領域を通じて他の林齢より作用モーメントが大きいことがわかる。

海岸林が津波減衰能力を持つためには、海岸林が津波外力に耐えて流体抵抗を發揮し続けなければならない。津波外力による樹木の根返りや傾き、幹折れなどに対する耐力は、樹木幹直径と密接な関係がある(例えば、近藤ら, 2006)。大きな樹冠部に津波流体力が作用するときは枝の折損が多いとされ、現地の地盤条件や根系の発達状況によっては根返りや傾きも多い。野口ら(2012a)、柳澤ら(2008)は、限界耐力モーメントを幹を円柱と仮定したときの断面係数 Z と曲げ強度 σ の積で表わしている。

$$M_{res} = \sigma Z = \sigma \frac{\pi}{32} d_0^3 \quad (10)$$

本解析では、上式のように幹径の代表値として胸高直径 d_0 をとり、 σ については樹齢や生育環境によって変化するため一般的な数値が決定できないことより、乾燥木材の曲げ強度を概略値として採用し、 $\sigma = 7.0 \times 10^7 \text{Pa}$ を与えた。(9)で計算される M_{ext} と(10)で計算される M_{res} の比について、林縁からの距離を横軸にとって示したものが図-11である。図より $\tau=10\text{year}$ の幼齢林では $x=8000 \sim 8200\text{m}$ までの範囲で M_{ext}/M_{res} が1を超え、倒伏する状態になることがわかる。 $\tau=40\text{year}$ の林分は、長い生長期間によって幹径が大きくなって破壊耐力が増加するが、一方で間引きの進行によって樹木密度が減少し津波の林内通過流速が大きくなるため、 M_{ext}/M_{res} が1を超える範囲は $\tau=20\text{year}$ と大差のない結果となった。

4. まとめ

本研究は、森林生態学や樹木形態学の知見に基づき立木密度の変化や樹木形状をモデル化し、林齢に伴う海岸林の津波減衰能力の変化を数値解析によって検討したものである。林齢によって個体樹木の幹径は大きくなるものの、一方で立木密度が減少し、枝下高が高くなって大きな流体抵抗を持つ樹冠部に津波が到達しなくなるため、

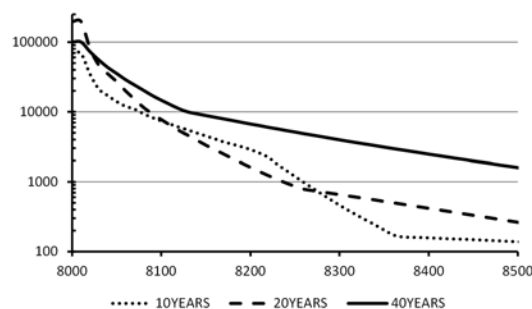


図-10 樹木に作用する流体力モーメントの最大値

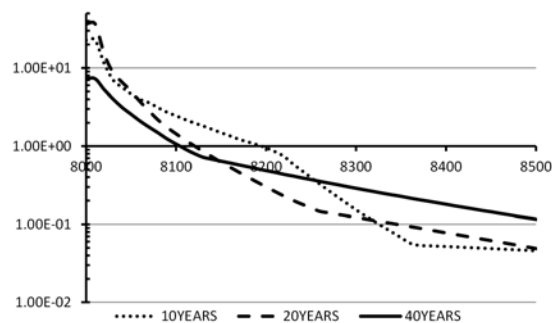


図-11 作用モーメント・耐力モーメント比

林齢がある年数を超えると全体的な流体抵抗力が減少し、津波の林分内遡上距離や通過流速が増加することがわかった。津波による樹木倒伏率についても、林齢の古い樹木個体は破壊耐力が大きい一方、一方で林内通過流速が増加するため、流体力と耐力の比で決まる樹木被災の範囲は林齢40年と20年では大差がないことが見いだされた。

参 考 文 献

- 浅野敏之・岩塚雄大(2006)：森林生態学に基づいた津波防潮林の防災機能の評価，海岸工学論文集，第53巻，pp.1081-1085.
- 浅野敏之・三谷敏博・三嶋俊樹(2007)：海岸林の幹直径の分布特性と津波による樹木倒伏率，海岸工学論文集，第54巻，pp.1376-1380.
- 野口宏典ら(2012a)：2011年東北地方太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害の数値シミュレーションを用いた検討，一青森県三沢市の場合，海岸林学会誌，Vol.11，No.2，pp.47-51.
- 野口宏典ら(2012b)：数値実験による海岸林の津波氾濫流減衰機能の検討，一水路実験によるクロマツの抵抗特性と被災地の林分・地形条件を用いて一，日本森林学会大会学術講演集，123，D6.
- 小田隆則(1984)：海岸クロマツ林の生長と密度について(IV)，一九十九里浜クロマツ林の現況一，日本林学会論文集，Vol.95，pp.553-554.
- 近藤観慈・小山美香・野々田稔郎・林拙郎(2006)：海岸クロマツ林の津波を想定した外力に対する根系抵抗力，日本森林学会学術講演集，117，G3.
- 林建二郎・斉藤良・浅野敏之・浦島三朗(2011)：海岸林に作用する流体力，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.67，No.2，pp.571-576.
- 原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦(2000)：防潮林の津波に対する減衰効果の検討，海岸工学論文集，第47巻，pp.366-370.
- 箕輪光博(1982)：林木の生長に関する理論的考察(I)，log - Mitscherlich 式の理論，日本林学会誌，Vol.64，No.12，pp.461 -467.
- 依田恭二(1971)：森林の生態学，築地書館，331p.
- 林野庁(2005)：海岸林防災機能の高度発揮のための管理システムに関する調査報告書，109p.
- 吉良竜夫・依田恭二(1957)：立木密度と生産量，北方林業，Vol.9，pp.2-6.
- 柳澤英明・越村俊一・宮城豊彦・今村文彦(2008)：2004年インド洋大津波におけるマングローブ林のフラジリティー関数と津波減衰効果，海岸工学論文集，第55巻，pp.286-290.

(発表論文)

- 寺本行芳・浅野敏之・岡勝(2014)：桜島における海岸クロマツの成長状況と表層土壌環境，日本海岸林学会誌 Vol. 32, 6page, (査読中).
- 永山裕也・松尾俊平・浅野敏之(2014)：津波遡上に及ぼす海岸林の減勢効果に関する数値解析，土木学会西部支部学術講演会講演集，II-251-252.
- 浅野敏之・永山裕也・松尾俊平(2014)：海岸林の時間的生長を考慮した津波減勢効果に関する数値解析，土木学会論文集 B2(海岸工学)(査読中).