

東北地方太平洋沖地震津波で被災した海岸林の流失と非流失を分けた地形条件の解析

—今後予想される大津波に対して海岸林が流失し難い地形条件とは—

清水 収^{1*}・佐藤太一郎^{1,2}

Topographical analysis of coastal forests to identify factors determining whether coastal forests were washed away by the 2011 Tohoku earthquake and tsunami

Osamu Shimizu^{1*} and Taichiro Sato^{1,2}

Abstract: Coastal forests that were entirely washed away by the 2011 Tohoku earthquake and tsunami turned into driftwood, increasing the tsunami damage. It is desirable that coastal forests should not be washed away by a tsunami even if they are knocked down. Using Google Earth images and 10-m mesh land elevation data, we investigated the relationship between types of forest damage (washed away or not) and topography in 17 coastal forests that were attacked by tsunamis of 6–16 m in height. In case of a tsunami height of <10 m, either a ground elevation of >3 m at the front of the forest, or an elevation of >1.2 m at the front and an elevation of >2 m at the rear of the forest was essential for coastal forests to not be washed away. In case of a tsunami height of >10 m, 4 factors were important for coastal forests to not be washed away: a ground elevation of >2 m at the front of the forest, a distance of >130 m from the shoreline to the forest, a forest width of >190 m between the front and the rear of the forest, and a ground slope steeper than 0.085 mm⁻¹ from the front to the rear of the forest. These findings can be applied to new countermeasures against anticipated Nankai Trough large-scale earthquakes and tsunamis.

1 はじめに

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震で発生した巨大な津波は、東北地方の太平洋沿岸部に甚大な被害をもたらした。クロマツ等の海岸林の多くも壊滅的な被害を受けたが、そのなかで林帯の残った海岸林は、漂流物を捕捉し、林帯の背後に存する人家等の被害を軽減した事例が報告されている(坂本ほか, 2012; 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会, 2012)。これに至らなくても、津波によってたとえ倒伏しても流失しなかった海岸林は、自らが漂流物にならず、少なくとも被害を拡大しなかったと思われる。

内閣府中央防災会議に設置された「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」は、2011年9月に報告をまとめた。その中で、今後は「発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波」(レベル1津波)と「発生頻度は極めて低いものの、甚大な被害をもたらす最大クラスの津波」(レベル2津波)の2つのレベルの津波を想定して、津波対策を再構築することとされた。これを受けて、日本各地、特に南海トラフ巨大地震による津波被害が心配される地域では、新たな津波被害想定と防災計画の策定が進められている。

そうした中、漂流物捕捉などの効果を有している海岸林は、津波防災計画における多重防御の一つと

みなすことが出来る(東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会, 2012)。それを積極的に防災・減災計画の中に位置づけるためには、海岸林が津波で流失しないことが前提であり、その条件を明らかにすることが重要である。

2 研究目的

本研究は前述の課題認識に基づき、日本各地のクロマツ等からなる海岸林が今後の大津波に対して流失し難い地形条件を見出すために、東北地方太平洋沖地震津波で被災した海岸林を広域から数多く調べて、流失した所と流失しなかった所の間で、林帯幅スケールの地形条件にどのような違いがあったかを解析する。

ここで、本研究において調査地の海岸林を広域から選んだ理由と、そのことに関連して、海岸林が流失するかしないかを林帯幅スケールで扱った理由を説明する。

東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会(2012, p.5)によると、海岸林の被災状況は津波の規模や地形等により多様であり、県別では岩手、宮城、福島、茨城の3県で被害が甚大で、これらに比べ青森県と茨城県では被害が軽微であったと述べられている。

これら5県に及ぶ海岸部の浸水高(津波到達時の潮位から津波の痕跡までの高さ、以下同様)の広域分布図(中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会, 2011, 資料3-2)によると、浸水高は三陸海岸で10m程度から20m超の間、仙台平野で10m前後、青森県と茨城県ではほぼ10m未満であった。このことから津波の高さは5県の中で大きく異なっており、そのため

¹ 宮崎大学農学部 Faculty of Agriculture, University of Miyazaki, Miyazaki, 889-2192 Japan

² 現在: 大分県南部振興局

Present Address: Southern Development Bureau, Oita Prefect. Gov., Saiki, Oita, 876-0813 Japan

*Corresponding author: smzo@cc.miyazaki-u.ac.jp

に岩手・宮城・福島3県と青森・茨城2県との間で海岸線の被害程度が異なると考えられる。

海岸線の被害程度が津波の高さに応じて異なったことから類推すると、本研究が見出そうとしている「津波に対して海岸線が流失しないために必要な地形条件」は、襲来する津波の高さに応じて異なることが予想される。そこで本研究は、検討対象とする津波高が極めて高いものからそうでないものまで幅広い範囲となるように、4県に及ぶ広域から数多くの調査地を選んだ。

さらに、多くの調査海岸線を扱う必要性から、林帯幅スケールで対象を扱うことにした。すなわち、各調査地の海岸線において林帯を横断する長い測線を複数設定し、それらの測線一つ一つを調査プロットのように扱った。具体的には、海岸線が流失したか流失しなかったかを測線ごとに判別し、またそれに影響を与えたと考えられる条件についても林帯幅スケールの地形条件を扱った。

そして、今後の津波防災に貢献するために、本研究の成果として得られる地形条件を、各地で想定されている今後の大津波に対し海岸線が流失しないかどうかを事前に判断する際の指標にしたいと考えた。そこで、津波想定作業が先行している宮城県、高知県、徳島県などでレベル1津波が高さ1~10m、レベル2津波が高さ10~20mと想定されていることを踏まえ、各地域で想定されるレベル1、レベル2津波の高さをそれぞれ10m未満、10m以上と設定した。そして、その2つのレベルに対応するよう、東北地方太平洋沖地震津波で被災した海岸線を津波高により10m未満と10m以上の2つのグループに分け、それぞれのグループにおいて海岸線が津波に対して流失しないための重要な地形条件を明らかにすることを試みた。

これまで東北地方太平洋沖地震津波による海岸線被害については、林分構造と被害の関係(佐藤創ほか, 2012)、林帯前方にあった防潮堤や盛土地形が海岸線被害に与えた影響(寺本ほか, 2012; 山中ほか, 2012)等が報告されている。また、地盤高が低く地下水水位が高い場所で、マツ類の根系発達の不良が原因で根返り被害が多くなったことが報告されている(東日本大震災に係る海岸防災線の再生に関する検討会, 2011, p.13; 山中ほか, 2013)。

これらは何れも一つの海岸線を詳しく調査している。一方、本研究は測線を単位とした簡易な調査によって各地の海岸線を数多く対象とすることで、津波高と地形条件にバリエーションの幅を持たせている点が、上記のこれまでの研究と異なる特徴である。

3 調査方法

3.1 調査地概要

調査地の一覧を表1に示す。調査した海岸線は海岸平野、砂州、河川河口付近などの低地に位置している。林相はGoogle Earth画像の判読から全て針葉樹林であり、樹種構成は様々な調査報告や画像資料よりクロマツが主体で、一部にはアカマツも含まれると判断された。

これらの調査地は、次の3点を全て満たしていることを条件に選定された。第一は津波が林帯を通過して後背地に到達していること、第二はGoogle Earth

において津波発生前と発生後の両方の画像が入手できること、第三は海岸線を襲った津波高が分かることである。表1に示した浸水高は、各調査海岸線に近く、かつ汀線に近い場所で得られた結果であり、本論では以降これを津波高と呼ぶことにする。本研究では津波高10m未満のグループとして7地区、津波高10m以上のグループとして10地区の海岸線を選定した。

表1 調査地の一覧と各々における浸水高

地区名	浸水高(m)
津波高10m未満の調査地	
青森県 おいらせ町一川目	6 *
岩手県 久慈市夏井町	7 *
福島県 相馬市磯部大洲	7 *
福島県 広野町下浅見川本町	8 **
福島県 広野町下北宮田	9 **
宮城県 七ヶ浜町菖蒲田浜	9 *
宮城県 仙台市若林区荒浜	9 *
津波高10m以上の調査地	
宮城県 名取市下増田	10 *
宮城県 岩沼市下野郷	10 *
宮城県 岩沼市寺島川向	11 *
宮城県 山元町花釜, 新浜, 笠野	11 *
宮城県 亙理町内浦, 吉田浜	12 *
岩手県 大船渡市三陸町吉浜	15 *
岩手県 陸前高田市高田松原	15 *
福島県 浪江町棚塩	15***
福島県 南相馬市原町区萱浜	15 **
福島県 南相馬市鹿島区南海老	16 **

浸水高は調査地に近い場所の結果で、出典は以下のとおり

* 中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会(2011)参考資料3

** 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2012)

*** 佐藤慎司ほか(2012)

3.2 流失と非流失の定義

この津波による海岸線樹木の被害形態として、流失、幹折れ、根返り、傾き・倒伏などが現地を確認されている(たとえば坂本, 2011)。このうち幹折れには、折れて形は変わったが樹木全体はその場に残るケースと、幹が途中で切断されて根元側が残り先端側が流失するケースの二つがある。後者のケースで流失した部位は、前述した被害形態における樹木全体の流失とあわせて漂流物となり、それらは津波によって後背地に侵入し、建物等への衝突や津波後の残留堆積(瓦礫化)等により津波被害を拡大させる。一方、幹折れの前者のケース、根返り、傾き・倒伏の場合は、樹木がその場に留まることで漂流物被害は起こさなかったことに加え、場合によっては他の漂流物を捕捉して被害を軽減した可能性がある。

そこで、本研究では海岸線が津波被害を拡大したか、軽減したかに焦点を合わせ、被災海岸線の状態を「流失」と「非流失」の2つに分類した。なお、この流失は前述した樹木被害形態での用法とは異なり、以下に記すように再定義を行う。

Google Earthで津波発生前の対象海岸線の輪郭を縁取り、それを発生後の画像(2011年3月~4月の

もの)に重ね、輪郭内における緑色の樹冠の有無によって流失と非流失を判別した。

流失とは、図1に示すようにもしも残存していれば葉によって緑色を呈するはずの樹冠が、ほとんど残存していないものを指す。該当地の全てにおいて地表面や水面が広く確認された。この流失には、樹体が全く残っていないものが含まれる。また、幹の途中で折損して枝葉を着けた部分全体が流失した場合であれば、それもここに含まれ、その場合は折損高より下部の幹が残っていると考えられる。

非流失とは、図2に示すように葉によって緑色を呈した樹冠が、津波前の林帯幅のうち一部分であっても群状に残存しているものを指す。立木であっても倒木であっても、樹冠が残存していればこれに含まれる。なお、画像の観察結果を概観すると、林帯幅スケールで全て倒木となっている場合よりも、倒木が多くを占めるが内陸側に立木の残存を伴っている場合の方が多かった。

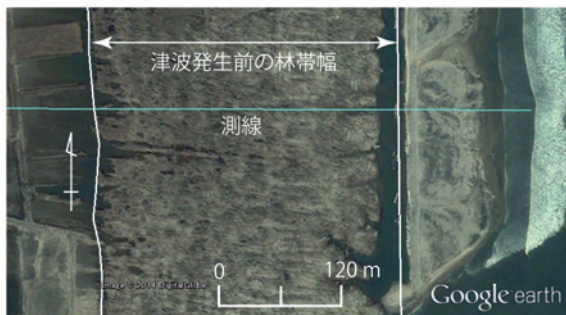


図1 「流失」の例

(図の右端の白い部分は、汀線に沿った白波)

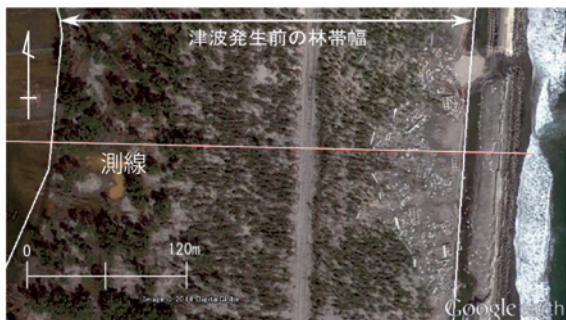


図2 「非流失」の例

(図の右端の白い部分は、汀線に沿った白波)

3.3 測線の設定と地形条件の抽出方法

Google Earth 画像上で囲った海岸林の輪郭は、汀線に沿った長さで大別すると、長さ200~300mの小サイズが5地区、長さ500m~1kmの中サイズが5地区、長さ3~6kmの大サイズが7地区である。これらにおいて、図1と図2中に例示したように、汀線と直交方向に汀線から内陸側林縁までの測線を引いた。測線数は小サイズと中サイズにおいては地区ごとに3~5本、大サイズでは地区ごとに5~9本である。その結果、測線同士の間隔は小サイズで40~100m、中サイズで100~250m、大サイズで400~800m程度となった。これらの測線において、前述した定

義に基づき測線ごとに流失か非流失かを判別した。ここまでの、海岸林の輪郭を作成してから測線を引くまでの作業は、Google Earth において行った。

次に、地形データには国土地理院 Web サイトの基盤地図情報のページ(国土地理院, 2013)からダウンロードした数値標高モデルを用いた。なお、数値標高モデルの選択に関して、震災後には地盤沈下等により地形が変化しているため、海岸林が津波に襲われた際には震災前に得られたデータを用いるのが望ましいと思われる。震災以前の地形データは10mメッシュのデータのみであったため、本研究ではそれを用いた。

そして、これ以降の作業は、位置情報を持つラスターデータやベクタデータの重ね合わせ等、GISソフトとして基本的な機能を持つQGISにて行った。まず、ダウンロードした標高データをQGISでラスターデータとして展開し、その上にGoogle Earthで作成した海岸林の輪郭と測線のベクタデータを重ねる。その後QGISプラグインのTerrain Profileを用い、各測線の地形断面図を作成した。そして、海岸林の流失と非流失に強く影響すると予想された7項目の地形条件を、測線ごとに地形断面図から読み取った。その7つの地形条件は、図3に示す汀線林縁間距離、汀線林縁間傾斜、海側林縁標高、陸側林縁標高、林内最大標高、林内傾斜、林帯幅である。なお、林内傾斜は陸側林縁標高から海側林縁標高を差し引いた値を林帯幅で除したもので、符号が正の場合は内陸に向かって高くなる上り勾配、符号が負の場合は内陸に向かって低くなる下り勾配であることを表す。

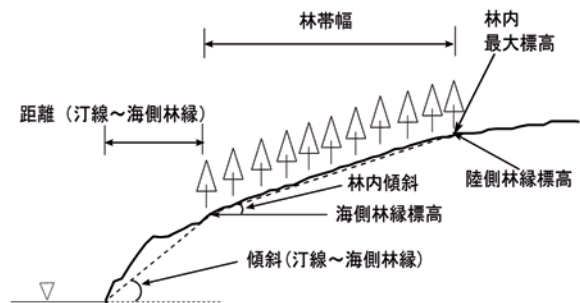


図3 7項目の地形条件の模式図

3.4 流れ図の作成方法

津波高10m未満と10m以上のそれぞれのグループにおいて、7項目の地形条件と流失・非流失との関係を調べるために、2つの条件を縦軸と横軸にとった図上で流失と非流失のプロットがどのように分かれるかを調べた。この図のことを判別図と呼ぶことにする。なお、7条件から2つの条件を取り出す組み合わせなので、組み合わせは全21通りであり、21種の判別図を作成した。全ての判別図において流失と非流失を分ける各条件の数値を調べ、その結果を集約して流れ図を作成した。

図4で説明すると、上の判別図において第一条件(縦軸)Aが5未満に流失の測線が分布し、10以上に非流失が分布する。そして、5~10の範囲に流失と非流失の両方が分布している。これを下の流れ図で示すと、「5未満→流失」「10以上→非流失」「5~

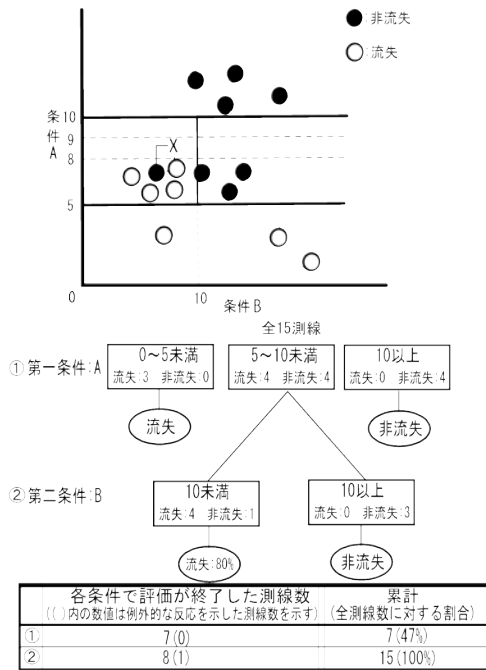


図4 判別図から流れ図作成への手順

未満→未確定」と、第一条件 A によって3つに分けることができる。「5～10未満」の測線は、第一条件ではまだ評価が終了していないため「未確定」となり、この集団が次の条件での評価に進む。第二条件（横軸）Bによると、10以上に非流失が分布し、10未満には流失が多く分布している。これを流れ図で示すと「10未満→ほぼ流失」「10以上→非流失」と、第二条件 B によって2つに分けることができ、これで全ての測線の評価が終了する。なお、判別図中に X で示すように、区分された領域内において他の測線と異なる反応を示した測線は「例外」と判定し、この数が少ない方が、その判別図から作成した流れ図の精度が高いものとする。したがって、作成する流れ図は可能な限り例外が少ないものを目指した。

最初の2条件の組み合わせで流失と非流失を分けきれなかった場合、その分けきれなかった測線は、他の異なる2つの条件の組み合わせを二番目に用いて評価を行うことになる。ただし、完成した流れ図において使用された条件数が少ないほど、そこに使われた条件は流失と非流失に大きく影響していると考えられるため、使用する判別図は2つまでとした。

判別図において流失と非流失の境界となる値については、判別図上で流失の割合、または非流失の割合が、その数値で区分された集団同士で全く異なるような値を選定した。また、この区分分けは海岸林が流失しない条件を明らかにしたいことから、非流失の条件を重視した。即ち、判別図上で非流失の集団と流失の集団が分かれ、かつそれらの間が離れている場合は、それら2つの集団の間に流失の測線が存在する可能性があることも考慮し、非流失の集団の下限値を境界の数値とした。例えば、図4の判別図では条件 A において8～10の範囲に測線が分布していないため、非流失の集団の下限値である「10」を境界としている。

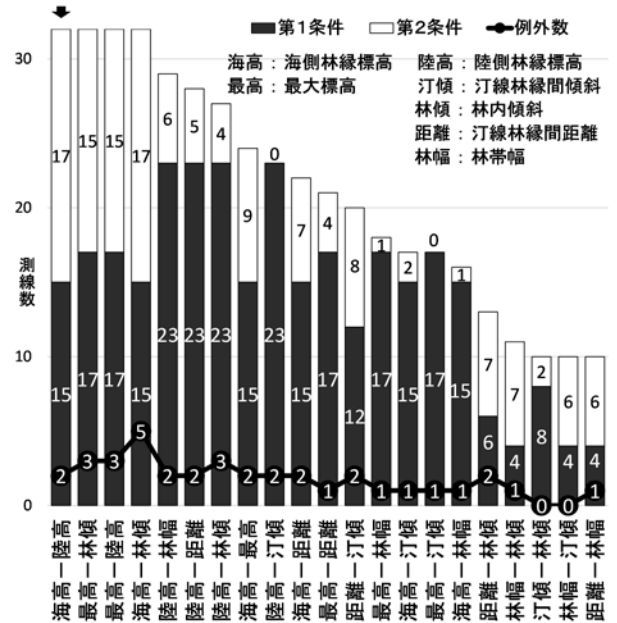


図5 津波高 10m 未満の各判別図における第1・第2条件での評価終了数と例外数

4 結果

4.1 津波高 10m 未満グループの解析結果

津波高 10m 未満の測線数は、全部で 32 である。図5に2条件の組み合わせ全21通りの判別図における、流失と非流失の評価が終了した数、ならびに例外数を示す。32 測線全てを評価できたのは、図の左側の4つで、このうち例外数が2と最も少ない左端の「海側林縁標高-陸側林縁標高」の組み合わせ（図中に黒矢印で示す）が最も優れている。そこでこれを採用することとし。その判別図を図6に示す。また、判別図の優劣を比較した際の例として、左から2番目の例外数3の「最大標高-林内傾斜」の判別図を図7に示す。

まず、図6を説明する。第一条件の海側林縁標高において、1.2m未満では3測線全てが流失していたが、3mを超えていると11測線が非流失で、例外は

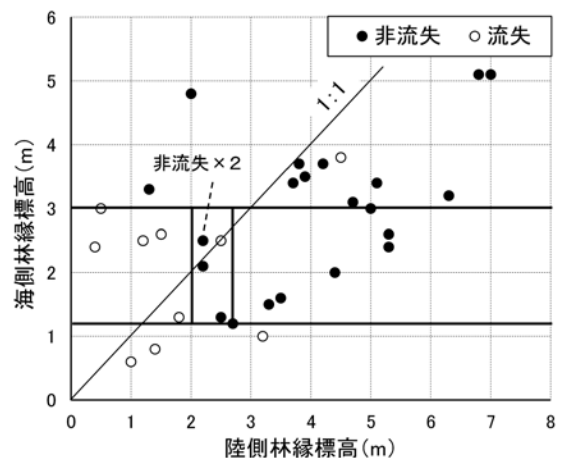


図6 海側林縁標高-陸側林縁標高の判別図（図中の斜め直線は5.考察にて説明される）

1であった。これらの間の海側林縁標高が 1.2m 以上 3m 以下の集団を、第二条件の陸側林縁標高で分けると、2m 以下では 5 測線全てが流失していたが、2~2.7m 未満では 5 測線中 4 が非流失であり、2.7m 以上になると 7 測線全てが非流失であった。このように未確定の測線を出すことなく、例外数も 2 と最少で、流失・非流失の評価ができた。

一方、図 7 を説明すると、第一条件の最大標高で 3 つに分けられ、そのうち中間の集団は第二条件の林内傾斜で 2 つに分けられる。この組み合わせでも未確定の測線はない。しかし、例外数が最少となるように引いた林内傾斜の境界線の近くには、多くの点が集まり、流失と非流失の間で傾斜の差が非常に小さいことから、この境界線が持つ条件の強さに不安がある。これに加えて図 7 の例外数が図 6 よりも 1 つ多かったことから、図 7 は採用しないことにした。

図 6 の結果から図 8 の流れ図を作成した。まず海側林縁標高で「1.2m 未満→流失」、「1.2m 以上 3m 以下→未確定」、「3m 超過→ほぼ非流失」となり、そのうち「1.2m 以上 3m 以下」については陸側林縁標高で「2m 以下→流失」「2m より大で 2.7m 未満→ほぼ非流失」「2.7m 以上→非流失」となる。

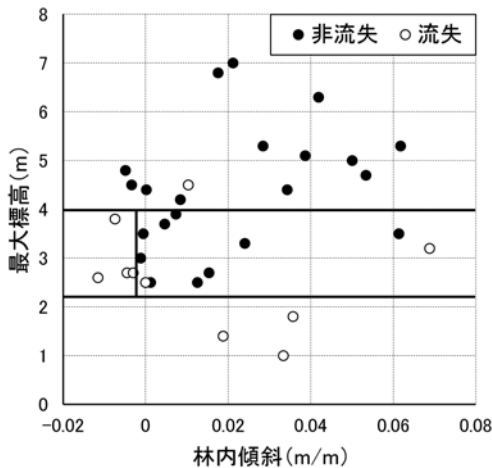


図 7 最大標高—林内傾斜の判別図

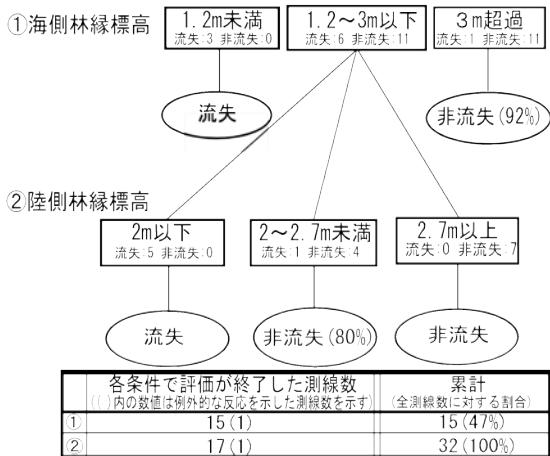


図 8 津波高 10m 未満グループの流れ図

4.2 津波高 10m 以上グループの解析結果

津波高 10m 以上の測線数は、全部で 58 である。このグループでは最初の 2 条件の組み合わせで流失と非流失を分けきれなかったため、その分けきれなかった測線は、残りの条件の中で、最も良く流失と非流失を分けることが出来る条件の組み合わせを探して、それを二番目に用いて評価した。したがって、このグループの条件組み合わせ数も、津波高 10m 未満グループと同じく 21 通りである。

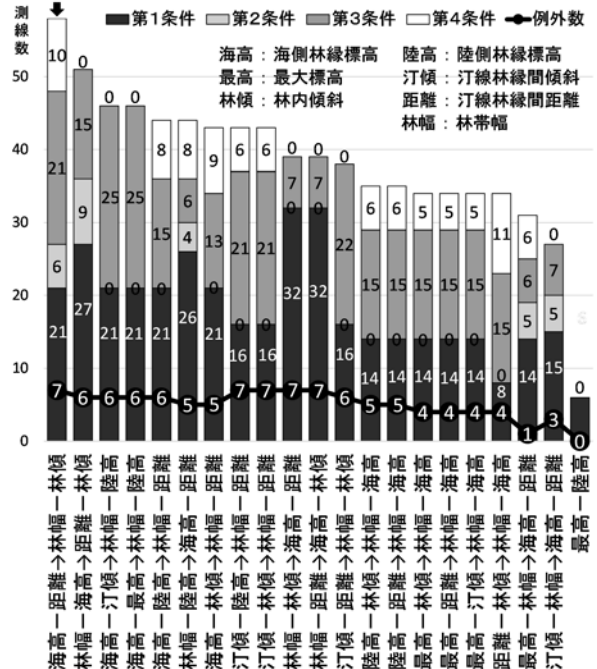


図 9 津波高 10m 以上の各判別図における第 1~第 4 条件での評価終了数と例外数

4 つの条件の組み合わせ 21 通りにおける、流失と非流失の評価が終了した数、ならびに例外数を図 9 に示す。58 測線の全てを評価できたのは、図の左端の「海側林縁標高—汀線林縁間距離」の組み合わせの次に「林帯幅—林内傾斜」の組み合わせを用いた場合のみであった。なお、図 9 で分かるように他の場合の多くは、2 つの判別図で 4 つの条件が検査されたにも関わらず、結果として使われた条件数が 3 あるいは 2 である。図 9 の右端のケースでは、最初の 2 条件の組み合わせのみで終わっている。これらは、ある条件で未確定となった測線群には、その次にどのような条件で検査しても、流失の集団と非流失の集団に完全に分けきれないものが、必ずある程度存在したことを表している。仮に、それらを例外として扱って流失と非流失の判別作業を続けると、最終の例外数が非常に多くなり、判別作業そのものが意味を持たなくなる。

採用された条件組み合わせの判別図は、以下のとおりであった。図 10 は、最初の組み合わせ「海側林縁標高—汀線林縁間距離」である。第一条件の海側林縁標高が 2m 未満では、19 測線が流失し、例外は 2 であった。海側林縁標高 2m 以上について、第二条件の汀線林縁間距離で分けると、130m 以上では 6

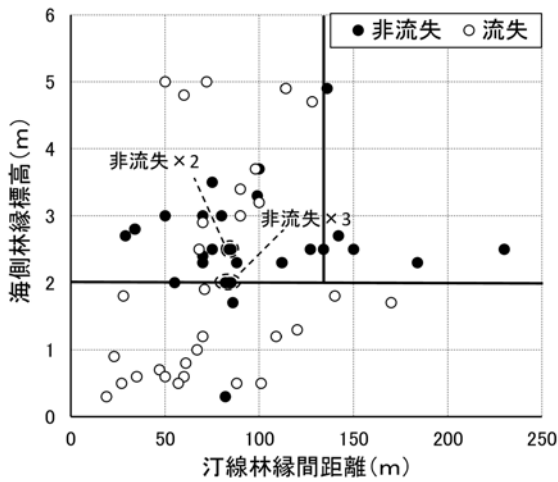


図 10 海側林縁標高一汀線林縁間距離の判別図

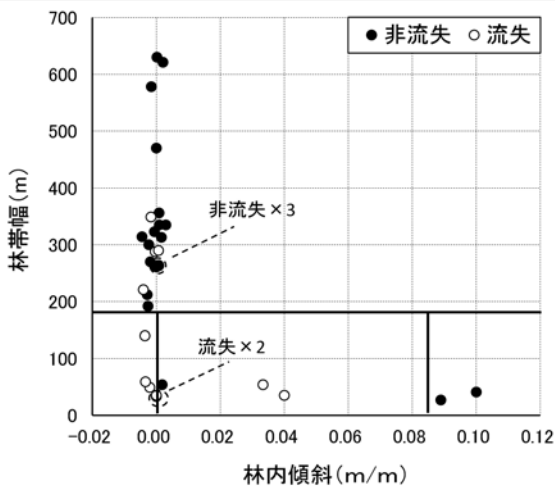


図 11 林帯幅－林内傾斜の判別図

測線全てが非流失であった。そして、残りの31測線、すなわち海側林縁標高 2m 以上で汀線林縁間距離 130m 未満は、次の組み合わせ条件による評価となる。

図 11 は、二番目の組み合わせ「林帯幅－林内傾斜」である。第三条件の林帯幅では、190m 以上の 17 測線が非流失で、例外は 4 であった。190m 未満については、第四条件の林内傾斜が 0.085 以上では 2 測線全て非流失であるのに対し、0 より大きく 0.085 未満では流失が多く（2 測線流失、1 測線非流失）、0 以下は 5 測線全て流失であった。このように、未確定の測線はなく、例外数は合計 7 であった。

これらを図 12 の流れ図に表すと、海側林縁標高において「2m 未満→ほぼ流失」と「2m 以上→未確定」に分かれ、後者は汀線林縁間距離において「130m 未満→未確定」と「130m 以上→非流失」に分かれる。図 10 の条件組み合わせはここまでであり、未確定のものは、次に図 11 の条件組み合わせに進む。林帯幅において「190m 以上→ほぼ非流失」と「190m 未満→未確定」に分かれ、このうち後者は林内傾斜において「0 以下→流失」「0～0.085 未満→過半数が流失」「0.085 以上→非流失」と三つに分けられる。

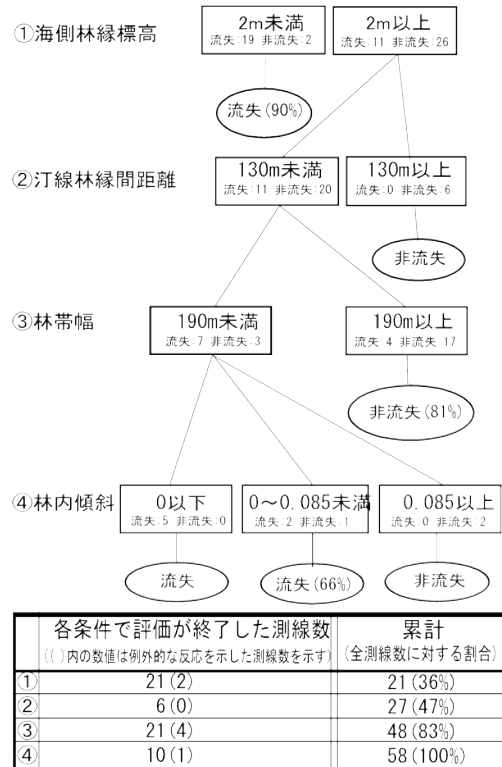


図 12 津波高 10m 以上グループの流れ図

5 考察

ここまで、大津波による海岸林の被害形態を、林帯幅全体にわたって流失するか、あるいは一部の範囲でも残存するか、という極めて大きな区分で捉えた場合、それらが分かれた条件を林帯幅スケールの地形条件の違いによって説明することができた。以降に津波高ごとに考察し、さらに両方に共通する内容について考察する。

5.1 津波高 10m 未満の場合

津波高 10m 未満のグループでは、海側林縁標高と陸側林縁標高の組み合わせが、流失と非流失を分けるのに最も優れていた。また、図 5 に示した全測線の評価できた他の 3 パターンの条件組み合わせにおいても、全てに標高が含まれ、その他は林内傾斜であった。

このことから、海岸林の標高が流失・非流失にとって最も重要であることが分かる。この理由は、津波で上昇した水面の高さが同じ場合、標高が高い所は浸水深が小さくなり、標高が低い所は浸水深が大きくなるためである。樹木が津波から受ける水平方向の力は、樹木の流れ方向への投影面積に比例するので、浸水深が大きいほど投影面積が大きくなって樹木はより大きな水平方向の力を受け、倒れや幹折れを起こしやすくなる。そのほか、樹木に作用する浮力も水没する体積に比例して増大する。したがって、浸水深が大きいと、樹木を流失させる側に働く作用が増大すると判断される。そして、その浸水深は上に述べたように標高に強く影響される。

また、東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会（2011, p.13-17）や山中ほか（2013）によれば、標高が低い所は地表から地下水面までの深

さが小さく、一方で根系の伸張は地下水面までの範囲に限られるため、結果として、標高が低い所は根系の発達深さが不十分で根返り木の被害が多かった、とされている。このことは、本研究の調査地にも該当している可能性が大いにあり、標高が流失と非流失に大きく影響したもう一つの理由と考えられる。

図 6, 図 8 に示したとおり、海側林縁標高が 3m 超過でほぼ非流失、また、そうでなくても海側林縁標高が 1.2m 以上で陸側林縁標高が 2m 超過であればほぼ非流失、であった。したがって、津波高が 10m 未満の場合、非流失のためにはそういう地形条件が望ましい。

なお、東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会 (2011, p.18) は、海岸林再生の実施にあたり生育基盤造成の指針として、地下水位から 2~3m 程度の地盤高さを確保した盛土が望ましい、としている。さらに、同検討会 (2011, p.15) は、海岸砂丘地の地下水位が T.P.+0.6~1.2m であった調査例を示している。そのように地下水位が海面高よりやや高いことを考慮しても、本研究で得られた標高の結果は、生育基盤造成のための指針の数値と大きく変わらない。したがって、本研究による非流失のために望ましい標高の条件は、根系発達面で望ましいと考えられている地下水位からの高さを確保している可能性が高いと考える。

さらに、林内傾斜について議論する。前述のように、全測線を評価できた 4 パターンの条件組み合わせの中には、標高以外に林内傾斜が出現したことから (図 5)、林内傾斜は標高に次いで影響力の大きい条件だと予想される。林内傾斜は、前述のとおり海側林縁標高と陸側林縁標高の高低差から求められるので、図 6 に描き加えてある海側林縁標高と陸側林縁標高が一致 (1:1) する斜め直線を境にして、右側の領域は内陸に向かって高くなる上り勾配、左側の領域は内陸に向かって低くなる下り勾配、をそれぞれ表している。図 6 において、傾斜も関与している可能性がある海側林縁標高 1.2m 以上 3m 以下の集団を検討すると、まず斜め直線の近傍にある 5 つの測線では流失と非流失が混在している。このことから、勾配 0 付近における僅かな上り勾配や下り勾配は、流失や非流失に与える影響が明瞭でないと判断される。他方、その 5 つの測線を除くと、非流失は上り勾配に、流失は下り勾配に分布している。

このことから、津波が林帯を通過する際に、林内傾斜が 0 から離れた明瞭な上り勾配か、あるいは明瞭な下り勾配かによって、海岸林の流失・非流失に影響を与える程度の、津波エネルギーの減衰や増大が生じている可能性がある。

5.2 津波高 10m 以上の場合

津波高 10m 以上のグループでは、第一条件の海側林縁標高で 2m 未満の測線がほぼ流失した。このことから、非流失のためには海側林縁標高 2m 以上が最低でも必要な条件と判断される。

第二条件の汀線林縁間距離において 130m 以上の測線が非流失であった。これは、津波が上陸してから海岸林に達するまでの距離が長いために、津波エネルギーが減衰したと推察される。津波は陸上を進行する際、地表との摩擦による抵抗を受けるので(首

藤, 2007)、その距離が長いほどエネルギーをより多く損失すると考えられる。

第三条件は林帯幅であり、林帯幅 190m 以上の測線はほぼ非流失であった。これは、津波が林帯を通過する際に、樹木群から受ける抵抗 (首藤, 2007) によって津波エネルギーが減衰することが理由だと考えられる。つまり、大きな津波エネルギーを受ける汀線側では著しい樹木の被害となるが、内陸に向かって林帯を通過していく間に津波エネルギーが次第に減衰していき、ある距離を進むとやがて樹木が流失しなくなる。この時、林帯幅が十分に大きければ、流失範囲より後方の樹木は残存している、という説明である。

これの傍証になることとして、非流失の測線において、測線上に倒伏と立木残存の両方が認められる場合、被害が弱い方の立木残存が陸側に位置し、被害が強い方の倒伏はそれより汀線側に広がっていた。

第四条件は林内傾斜である。林内傾斜 0.085 以上の 2 測線が非流失であるが、サンプル数が 2 と少ないこと、さらに、次に大きい林内傾斜の 0.040 との間がかなり離れていること (図 11) の 2 点より、この境界線を持つ条件の強さは、やや弱い可能性がある。また、林内傾斜 0 における境界線については、0 以下が全て流失となり合理的な結果だが、0~0.085 未満でも流失が多いという結果であり、条件の重要性がやや低い。これらを総合すると、第四条件の林内傾斜は第一条件から第三条件までと比べると、相対的に重要度が低いと考えられる。

5.3 両方に共通する内容

2つのグループにおける共通点として、津波高 10m 未満では第一条件が海側林縁標高、津波高 10m 以上では第一第二条件の組み合わせが海側林縁標高と汀線林縁間距離であり、どちらのグループでも、まず「津波が海側林縁に到達するまでの条件」となっている。そして、その続きは、津波高 10m 未満では第二条件が陸側林縁標高、津波高 10m 以上では第三第四条件の組み合わせが林帯幅と林内傾斜であり、これも共通して「津波が林帯を通過する際の条件」である。このように、両グループとも大きな枠組みとして「津波が海側林縁に到達するまでの条件→津波が林帯を通過する際の条件」という順番になっていることが分かる。

また、図 8 と図 12 の下の表に示すように、津波高 10m 未満では全測線の 47%、津波高 10m 以上でも全測線の 47%が「津波が海側林縁に到達するまでの条件」によって、流失・非流失が評価されている。このことから、最初のこの条件によって海岸林の流失と非流失のほぼ半数が決定されるものと判断され、海岸林が流失しないために優先度の高い条件と考えられる。

これらを踏まえて、今後想定されるレベル1津波、レベル2津波のどちらの津波に対しても、海岸林が流失し難い地形条件を挙げるとすると、両グループで見出された「津波が海側林縁に到達するまでの条件」から判断して、海側林縁標高 3m 超過、そして汀線林縁間距離 130m 以上、が優先度の高い条件である。さらに、これに加えて「津波が林帯を通過する際の条件」である林帯幅 190m 以上の条件が満た

されると、海岸林が流失しない可能性がより高くなる。

6 まとめ

東北地方太平洋沖地震の津波で被災した海岸林の地形条件を Google Earth 画像、数値標高モデル、QGIS を用いて抽出し、被災海岸林を津波高 10m 未満、10m 以上の 2 つのグループに分け、林帯幅スケールにおける流失と非流失に影響した地形条件を解析した。

その結果、津波高 10m 未満 (6~9m) では海岸林の標高が流失と非流失に大きく関わっていることが判明した。非流失のために望ましい条件は、海側林縁標高 3m 超過であり、それが満たされない場合は海側林縁標高 1.2m 以上でかつ陸側林縁標高 2m 超過である。また、林内の平均傾斜も影響している可能性が判明した。

一方、津波高 10m 以上 (10~16m) では、海側林縁標高が 2m 以上であることが、非流失のために最低でも必要である。次いで汀線林縁間距離 130m 以上、あるいは林帯幅 190m 以上が、非流失のために必要な条件であった。また、それらが満たされなくても、少数の事例ではあるが林内傾斜 0.085 以上の場合は非流失であった。

津波高 10m 未満と 10m 以上共に、海岸林の流失・非流失を分ける地形条件の枠組みは「津波が海側林縁に到達するまでの条件→津波が林帯を通過する際の条件」という順番であった。これは、津波が上陸してからの海岸林に達するまでの条件によって最初に津波エネルギーが減衰し、その後、林帯内を通過する際にも減衰して、最終的に林帯後方の樹木が流失を免れる、という海岸林の破壊プロセスを想定すると、それに合致している。さらに、最初の「津波が海側林縁に到達するまでの条件」によって流失と非流失のほぼ半数が決定されることが判明し、海岸林が流失しないためにより優先度の高い条件だと考えられた。

最後に、平成 26 年度林野庁関係予算では、治山事業における主要な取り組みとして「津波に対する多重防御の一つとしての海岸防災林の整備の推進」が挙げられ、津波に対する耐性を有した海岸防災林の整備が、現在、日本各地で目指されている (林野庁、2014)。こうした中で、本研究で得られた地形条件は、日本各地の海岸林が今後想定される大津波によって流失しないかどうかを、現時点で事前評価しようとする際に、有効な指標の一つとなり、さらに津波に対して耐性を有する海岸防災林の整備目標の一つの指針を与えるものと考えられる。

末筆ながら、本論文は査読者の助言により大いに改善された。ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

- [1] 中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 (2011) : 第 1 回会合の資料 3-2, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/1/pdf/3-2.pdf>, および参考資料 3, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/1/pdf/sub3.pdf> 2014.6.9 閲覧
- [2] 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討

- 会 (2011) : 第 4 回検討会, 資料 6 (4 の 1), pp.1-18, <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/dai4kai-siryoku6-4-1.pdf> 2014.6.8 閲覧
- [3] 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会 (2012) : 今後における海岸防災林の再生について, 24pp., <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/kaiganbousairinsaisyuuhoukoku.pdf> 2014.6.8 閲覧
- [4] 国土地理院 (2013) : 基盤地図情報ダウンロードサービス, <http://fgd.gsi.go.jp/download/> 2013 年にデータをダウンロード
- [5] 林野庁 (2014) : 平成 26 年度予算の概要, 森林整備事業・治山事業 (公共), http://www.rinya.maff.go.jp/j/rinsei/yosankesan/pdf/13_26_kettei.pdf 2014.8.15 閲覧
- [6] 坂本知己 (2011) : 平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波による海岸防災林の被害 (速報), 砂防学会誌, 64 (2), pp.49-53
- [7] 坂本知己・新山馨・中村克典・小谷英司・平井敬三・齋藤武史・木村公樹・今純一 (2012) : 東北地方太平洋沖地震津波における海岸林の漂流物捕捉効果—青森県八戸市市川町の事例—, 海岸林学会誌, 11 (2), pp.65-70
- [8] 佐藤創・鳥田宏行・真坂一彦・阿部友幸・野口宏典・木村公樹・坂本知己 (2012) : 東北地方太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害と林分構造の関係—青森県三沢市の例—, 海岸林学会誌, 11 (2), pp.41-45
- [9] 佐藤慎司・Yeh, H.・磯部雅彦・水橋光希・相澤広志・芦野英明 (2012) : 福島県中部沿岸における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の挙動, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 68 (2), pp.I_346-I_350
- [10] 首藤伸夫 (2007) : 抵抗則, 津波の事典, 朝倉書店, pp.148-149
- [11] 寺本行芳・浅野敏之・林建二郎・多田毅・今井健太郎・坂本知己 (2012) : 2011 年東北地方太平洋沖地震津波発生後の宮城県名取市閑上浜における海岸林被害と残土盛土による海岸林の被害軽減効果, 海岸林学会誌, 11 (1), pp.11-18
- [12] 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2012) : 津波痕跡調査結果, <http://www.coastal.jp/ttjt/> 2014.6.11 閲覧
- [13] 山中啓介・藤原道郎・林田光祐・後藤義明・鈴木覚・宮前崇・井上章二・坂本知己 (2012) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震で発生した津波が仙台市井土地区の海岸林に及ぼした影響—防潮堤と海岸クロマツ林の被害との関係—, 海岸林学会誌, 11 (1), pp.19-25
- [14] 山中啓介・藤原道郎・林田光祐・後藤義明・鈴木覚・宮前崇・井上章二・小谷英司・坂本知己 (2013) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震で発生した津波が宮城県仙台市井土地区の海岸林に及ぼした影響 (II) —アカマツ・クロマツ大径木で構成される海岸林の被害状況—, 海岸林学会誌, 12 (1), pp.1-7

[受付 平成 26 年 2 月 13 日, 受理 平成 26 年 9 月 24 日]