仙台平野沿岸に植栽された海岸保安林の歴史と 東北地方太平洋沖地震津波に対する効果

History and Effect of Coastal Forestation
against the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami at Coast of Sendai Plain

後藤 浩¹・祖父江一馬²・有馬勇人²・石野和男³・玉井信行⁴・竹澤三雄⁵

Hiroshi GOTOH, Kazuma Sobue, Hayato ARIMA, Kazuo ISHINO
Nobuyuki TAMAI and Mitsuo TAKEZAWA

The Great East Japan Earthquake occurred on March 11, 2011 and the coastal zones along the Pacific Ocean in Tohoku area have received severe damage by tsunami. Most of coastal forestations have been severely damaged or swept away due to a gigantic tsunami. In this paper, historical background of coastal forestation was studied by detailed literature surveys. An instructive formula was developed between damage level of houses and a distance from coastal forestation by field investigations at the coast of Sendai plain. Furthermore, damage level of houses was clarified as a function of inundation depth of tsunami with influence of a housing code.

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波は、東日本太平洋沿岸地域に重篤な被害を与えた。沿岸の海岸保全施設は津波の浸入を軽減しつつも、その多くが破壊された。同時に、当該震災以前に沿岸の良好な景観を構成していた多くの海岸保安林（以下、海岸林と呼ぶ）も津波により流失した。一部報道によれば、海岸林の津波防備効果へ疑問譜をつける論調も幾つか見られたが、これは精緻な検証を基にした言説ではない。前報（後藤ら、2012）では、津波によって被災した沿岸地域の海岸林を現地調査してその全体像を示し、特に、その中から海岸林の流失がなかった宮城県石巻市ながはま海浜公園を抽出し、海岸林後背地の家屋の被害レベルに注目して海岸林の津波防備効果の存在を明らかにした。本報では、図-1に示す調査地点を選定し、各調査地点での海岸林の生い立ちを文献から調査した。そして、その後の変遷を空中写真および地形図を精査することによって考察し、重ねて現地で状況を確認して過去の海岸林の津波防備効果を検証した。また、仙台平野を対象に家屋の被害状況を調査し、浸水したものの破壊を免れた家屋（以下、レベルCと呼ぶ）が現れる海岸線からの最初の位置までの距離などを提示して海岸林の津波防備効果を考察した。さらに、レベルCの家屋と判定される場合の家屋

図-1 調査対象地域

の最大浸水深を明らかにし、例えば、家屋被災レベル低減のための嵩上げの指標の参考となる値を提案し、既往の研究の結果との比較を行った。

1 正会員 博(工) 日本大学准教授 理工学部 まちづくり工学科
2 学生会員 学(工) 日本大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻
3 正会員 博(工) (株)アジア共同設計コンサルタント
4 フェロー 工博 東京大学名誉教授
5 フェロー 工博 日本大学名誉教授

2. 調査方法

(1) 海岸林の歴史に関する調査

調査対象地点は、仙台平野を中心として北は岩手県陸前高田市の高田松原、石巻市ながはま地区、東松島市沿岸も含め南は宮城県亶理郡山元町までの主要な海岸林植生地である（図-1参照）。調査方法としては、現地調査、文献調査から得られる情報（山元町，1998；日本緑化センター，2009；小林，2011；首藤，2011）と戦後米軍による撮影を皮切りに現在までの情報がストックされている空中写真（国土地理院所蔵）および1901年以降の地形図（今昔マップ）を利用し、土地利用の変遷の情報を得て、海岸林の植栽状況の変化を考察した。

(2) 海岸林の津波防備効果に関する調査調査

対象地域は、図-1に示す宮城県仙台平野沿岸の海岸林植生地で、調査地を15カ所選定した。調査は2012年8月に3回実施し、調査地では、樹林帯の立木密度、樹高、平均胸高直径、樹林帯幅などの林分調査を行い、同時に後背地の家屋の被災状況調査を行った。家屋の被災レベルは、“津波によって家屋そのものが流失した場合もしくは壁がなくなり大損壊した場合”（レベルA）（図-2（a）），“家屋の流失は逃れたものの扉・窓がぬけ内部が破壊された場合”（レベルB）（図-2（b）），“家屋が浸水したものの破壊は免れた場合（レベルC）（図-2（c））”に分類した。なお、林分調査における樹高などの測定や浸水痕に基づく浸水深の測定については、メジャーとレーザー距離計を用いた。

3. 調査結果

(1) 海岸林の歴史に関する調査

a) 文献調査の結果（海岸林の始まり）

岩手県陸前高田市沿岸の海岸林（高田松原）については、地元豪商により1667年（寛文7年）に「防風」のため、クロマツおよびアカマツ7千本が植栽され、さらに、1673年（延宝元年）に、1万8千本にまで増植されたことが始まりである。また、昭和三陸津波においては、海岸林の全部が冠水、約3割が枯死し、さらに、1960年のチリ

津波時には3～4mの津波高に対して3千本の海岸林が倒壊、約2万本が遠くまで枯死するとの予測が立てられる程の被害があったとの報告がある。しかしながら、例えば、昭和三陸津波においては、眺望確保のためマツを伐採した旅館とマツを伐採しなかった旅館とで被害に差が見られたとの報告も残っているなど津波防備の効果が示され、その後も地域住民によってこれらのマツが大事に育成されている。石巻市ながはま地区の海岸林については、近隣の門脇海岸での状況が史実として伝えられている。仙台藩は、「潮風防備」のため1732年（享保17年）にクロマツの種子を遠州から取り寄せ整備を進めた。その後、昭和三陸津波時には波高2.1m、1960年のチリ津波時には波高2.7mの津波に襲われたが、その後も継続的に海岸林は地域住民により良好な育成環境が確保されてきた。

東松島市沿岸の海岸林については、1789年（寛政元年）以降に仙台藩によるクロマツ1万5千本の植栽が始まりで、その後、海岸林は地域住民により大切に育成され繁茂し、さらに、1886年（明治19年）以降には6万本のクロマツの苗木が行政により追加して植えられている。

宮城県仙台平野沿岸の海岸林については、慶長5年頃（1600年頃）に、仙台藩主伊達正宗が「防砂」のため遠州（静岡県）よりクロマツの種子を取り寄せ苗木を育成、植栽したことが始まりである。そして、明治以降も、「潮害防備」の目的が付与され海岸林の育成が行われている。以上のような始まりを有する海岸林群の植林事業は、その後も、凶作の末の罹災民救済事業（1906年）、産業奨励策事業（1939年）、三陸津波防備効果の好評価からの事業（1935年）などとして実施された。

このように、これら地域の海岸林は発展的変遷を遂げてきており、当該地震津波発生に至るまでの江戸時代からの長い期間、幾重にもわたる津波の来襲に耐えて住民にもその効果が認められ、維持・発展に努力が払われてきた。

b) 空中写真・地形図による調査結果（過去100年間の海岸林の変遷）

各調査地の空中写真・地形図の変遷を見比べて、海岸林の植栽状況の変化を検討した。表-1は、それぞれのツ

(a) レベルAの場合の一例

(b) レベルBの場合の一例

(c) レベルCの場合の一例

図-2 家屋の破壊レベル

表-1 調査地の海岸保安林と土地変遷との関係

調査地	1947年以前	1947年以降	海岸林帯の被災後の様子	津波高	海岸堤防高と樹林の状況
陸前高田市 沿岸	1913年には、海岸林が存在し、その後背地には沼、荒地が広がる。	1948年から本津波前まであまり変化せず、海岸林の後背地は水田や道路の整備が進んでいる。【Case (IV)】	1本を除きすべて流失。	15.4 m	5.5m (堤外地に樹林)
石巻市 ながはま地区	1913年には、海岸線全域に樹林帯が存在し、その後背地には荒地が広がっている。	1952年には、海岸林が存在し、年を追うごとに海岸林の整備が進んでいる様子が見受けられる。また海岸林の中に歩道ができていない。【Case (I)】	樹林のわずかが流失、倒伏、枯死。	8.6 m	6.2m (堤内地に樹林)
東松島市	① 1912年には、北上運河内陸側および海寄りの領域に海岸林が広がっている。	1952年には、海岸林が存在し、年を追うごとに海岸林の整備が進んでいる様子が見受けられる。また海岸林の中に歩道ができていない。【Case (I)】	樹林の多くが流出もしくは枯死。	7.6 m	5.0-6.2m (堤内地に樹林)
	② 1912年には、北上運河の後背地に海岸林が広がっている。	1948年には、北上運河より海寄りの領域に海岸林は存在しないが、1968年にはわずかに植栽がされ、その後繁茂している。なお、1948年には北上運河内陸側で海岸林が繁茂し、その状態は概ね変化しない。【Case (IV)】	海岸線付近の樹林はほぼ流失、運河後背地の樹林が一部流失、倒伏、枯死。	6.2 m	4.5-6.2m (堤内地に樹林)
	③ 1912年には、鳴瀬川河口位置の変化はないが、海岸林が存在しない。	1956年には、海岸線と東名運河の間の領域に海岸林が存在し、1961年には海岸林の中に食い込む形で住宅の立地が見られるようになる。【Case (II)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	10.4 m	4.5-6.2m (堤内地に樹林)
	④ 1912年には、広範囲に海岸付近まで林はあったが、荒地と考えられる領域の方が大きい。	1952年には、幅狭の海岸林が存在し、その後背地には水田が存在している。その後、年を追うごとに海岸林の整備が進められ幅が広がる。【Case (I)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	5.5 m	4.5-6.2m (堤内地および一部堤外地に樹林)
仙台平野	① 1901年には、水田と海岸林が混在して記載されている。	1947年には、沿岸の一部に海岸林の形成がみられる。しかし、1977年には、工場の進出等により海岸林の伐採がなされ一部を残してなくなっている。【Case (IV)】	ほぼ流失。	13.9 m	5.2-7.2m (堤外地に樹林)
	② 1901年には、海岸林の植栽が認められる。	1947年から海岸林は存在し、植栽が粗から密へ変化し海岸林の整備が進んでいる。【Case (III)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	9.6 m	5.2-7.2m (堤内地と一部堤外地に樹林)
	③ 1901年には、海岸林の植栽が認められる。	1947年から海岸林が存在するが、海岸林に食い込む形で宅地などの土地利用となっている。その後、概ね海岸林の様子に大きな変化はない。【Case (I)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	5.6 m	5.2-7.2m (堤内地に樹林)
	④ 1901年には、海岸林の植栽が認められる。	1947年から海岸林の様子に大きな変化はない。【Case (I)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	12.4 m	5.2-7.2m (堤内地、一部堤外地に樹林)
	⑤ 1901年には、名取川河口が現在より南側に位置しており、海岸林の植栽はない。	1947年には、海岸林は見られず沿岸砂州の形成が見られる。1977年には、わずかに海岸林の形成が見られ、年を追うごとに海岸林が広がっていく。【Case (IV)】	ほぼ倒伏、流失。	7.7 m	5.2-7.2m (堤内地、一部堤外地に樹林)
	⑥ 1901年には、貞山堀の後背地に荒地と海岸林が見られる。	1947年から海岸線に沿った海岸林の状況に概ね変化はなく、その後、さらに整備されている。【Case (I)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	4.8 m	5.2-7.2m (堤内地に樹林)
	⑦ 1901年には、幅広に海岸林とその中に水田が点在している。	1947年において、海岸線に沿った海岸林の状況は植栽面積の減少が見られるが、その後、概ね変化していない。なお、海岸林に食い込む形で、従来、水田であった土地が宅地などになっている。【Case (II)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	11.7 m	5.2-7.2m (堤外地に樹林)
	⑧ 1901年には、幅広で海岸林とその中に水田が点在している。	1947年において、海岸林は存在し、その後、些少の植栽面積の減少が見られるが、近年まで概ね変化していない。【Case (II)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	7.6 m	5.2-7.2m (堤内地に樹林)
	⑨ 1901年には海岸線まで宅地などの土地利用が見られ、僅かに海岸線と宅地利用との間に海岸林がある。	1947年において、幅広の海岸林に宅地または農耕地が食い込み、この様子は近年まで変化していない。【Case (I)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	8.9 m	5.2-7.2m (堤内地に樹林)
	⑩ 1901年には、海岸林の植栽が認められる。	1947年には、海岸林が存在し、その後、植栽が粗から密に変化している。1988年には一部伐採され土地利用が変化している。【Case (II)・(III)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	4.8 m	5.2-7.2m (堤内地および一部堤外地に樹林)
	⑪ 1901年には、沿岸部は荒地となっている。	1947年には、砂州上にわずかに海岸林の植栽が認められる。年を追うごとに植栽が拡大している。【Case (IV)】	ほぼ倒伏、流失。	7.9 m	6.2-7.2m (堤内地に樹林)
	⑫ 1901年には、海岸林の植栽が認められる。	1947年には、海岸林の植栽がある。さらに、年を経るにつれて植栽が粗から密になっている。【Case (III)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	5.2 m	6.2-7.2m (堤内地に樹林)
	⑬ 1901年には、海岸林の植栽が認められる。	1947年には、海岸林の一部が1988年までに一部伐採され、浜辺の方へ宅地が広がっている。その後の様子は、概ね変化していない。【Case (II)・(III)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	7.3 m	6.2-7.2m (堤内地に樹林)
	⑭・⑮ 1901年には、海岸林の植栽が認められる。	1952年には、海岸林が存在し、1983年には、耕地拡大によると考えられる海岸林伐採が見られたが、それ以降の顕著な変化はない。【Case (II)・(III)】	樹林が一部流失、倒伏、枯死。	8.6 m	6.2-7.2m (堤内地に樹林)

※「樹林帯の被災後の様子」は、著者らの現地視察の結果、Google Earth, 東北地方整備局(2011)を参考にした。※「津波高」は、原口ら(2011)を閲覧し、調査地域近隣の中で最も大きい値を参照し四捨五入して表示した。※「海岸堤防の状況」については、著者らの現地視察の結果、Google Earth, 東北地方整備局(2011), 原口ら(2011)を参考にした。

ールから得られる情報を用いて、各調査地の状況を簡潔に整理した一覧である。いずれの調査地においても、海岸林は1900年頃から存在しているが、「(I) 海岸林に概ね変化が見られない場合」・「(II) 海岸林の宅地などへの土地利用の転換により海岸林が減少している場合」・

「(III) 海岸林の成長が見られ空中写真での陰影が疎から密となっている場合」・「(IV) 河口位置が固定していなかった河口を導流堤・港の建設によって固定化させたことによって生まれた砂地盤の土地へ新たな植栽を行って海岸林が増加した場合」に大別できる。表-1に示され

るように、当該地震津波によりCase (I), (II), (III) と考えられる調査地については、津波被災後の状況として「一部流失、倒伏もしくは枯死」と判定されるが、Case (IV) かつ海岸林の多くが堤外地に繁茂する調査地「陸前高田市沿岸の海岸林」、「東松島市調査地点②の海岸線に沿った調査地」、「仙台平野調査地①・⑤・⑪」については、「ほぼ倒伏、流失」と判定される。このように、海岸林の被災が、津波高、海岸堤防の有無だけでなく植栽された土地の変遷にも影響していることが理解され、海岸林の流失が激しい場合は植栽された土地がほぼ砂地盤であるとの共通項が見出せる。

(2) 海岸林の津波防備効果に関する調査結果と考察

調査では、仙台平野の調査地15カ所全てについて、地域を徒歩により縦横に踏査・目視した。調査結果である野帳を整理した一例（調査地⑬の例）を図-3に示す。図-3に示すように、被災家屋をレベルA～Cと判断し、浸水痕より得られる浸水深を測定し、樹林帯幅 W_F と海岸線からレベルCの家屋が現れる最初の位置までの距離 x_C を定めた。以下、調査地15カ所全体をまとめた結果を説明する。

a) 樹林帯幅 W_F と海岸線からレベルCの家屋が現れる最初の位置までの距離 x_C との関係について

図-4は、 x_C と W_F との関係である。図-4に示されるように、 W_F が大きくなると x_C が小さくなる。図-5は、図-4における与えられた W_F に対する x_C のばらつきについて検討するために、 x_C および W_F （被災前と被災後の変化も併記）とともに海岸線から内陸側方向に向かう場合に横断する河川の幅の合計、海岸林の立木密度、主要道路および鉄道路線の存在の有無を示したものである。なお、図-5中記載をしていないが、この地域での海岸堤防は、従来T.P.+5.2～7.2mの高さで一様に整備されており（国土交通省東北地方整備局, 2011）、そこに来襲した津波高は、堤防付近における浸水痕からの測定結果として最大でT.P.+13～14mであったことが報告されている（原口ら, 2011）。調査地のほとんどの場所で貞山堀を含む水路が海岸線に対して平行に存在しているため、この存在によ

る津波防備効果があったものと考えられるが、その程度については判定できなかった。また、鉄道路線や主要道路の存在の有無によって x_C が異なっていたりすることから、海岸線と平行で段差のある構造物が x_C の大きさに影響を与えているものと考えられる。さらに、図-4中には、浸水深測定位置での大凡のT.P.値を併記したが、この大小による影響によるものや、例えば、後背地に丘が迫る調査地⑭と⑮では津波の重複的な挙動によって W_F に対して x_C が小さくなっていると考えられる地点もある。このような状況がデータのばらつきの原因となっているものと推察されるが、以上のばらつきの原因を無視したとしても、 x_C (m) と W_F (m) の関係として (1) 式が得られる (r は相関係数)。

$$x_C = -1.14W_F + 2075 \quad (r=-0.66) \quad \cdots \cdots (1)$$

b) レベルCと判定される家屋の最大浸水深について

図-6は、被災した一戸建て家屋における浸水深 h_i と海岸線からの各浸水深の測定位置までの距離 x を海岸線からレベルCの家屋が現れる最初の位置までの距離 x_C で除した値とで整理したものである。図-6に示されるように、東北地方太平洋沖地震津波において、仙台平野の場合、 x_C の位置でレベルCとなる浸水深の最大値の範囲は1.0～3.5mであった。なお、著者らが以前実施した石巻市ながはま海浜公園海岸林背後地の調査結果（後藤ら, 2012）

図-4 x_C と W_F との関係

図-3 調査結果の一例（調査地⑬の場合）

図-5 W_F 以外で x_C に与える因子の状況

図-6 レベルCと判定される家屋の浸水深 h_1 の最大値の判定

では、レベルCとなる浸水深の最大値の範囲は1.0～3.05mであった。すなわち、概ね1階部分の浸水のみの場合、レベルCとなることが理解される。このことは、日本建築学会東北支部の調査による「4m以上の津波に襲われた地域では全壊もしくは流失し2m以下では100%残存」(東京新聞, 2011)との結果および首藤(1992)により木造家屋が漂流物化する閾値として明らかにされた2mと概ね対応していると考えられる。また、図-6において、建築基準法(耐震性能)が改正された1981年以降の家屋の場合のデータと1981年以前の場合および建築後数十年オーダーの古民家と判断される家屋の場合のデータとに分け、最小二乗法にてそれぞれの回帰曲線を作成し(図-6中の r は相関係数)、レベルCに至る最大浸水深を検討した結果、建築基準法(耐震性能)が改正された1981年以降の家屋の方が、1981年以前の古い家屋の場合に比べ50cm～1m程度大きくなった。従来、松富ら(1994)により、浸水深と家屋との被害程度について検討がなされ、破壊レベルが「全壊・大破・中破・小破・浸水」の5段階での定義がなされている。本研究による家屋破壊レベル定義との比較をすれば、「全壊・大破」がレベルA, 「中破」がレベルB, 「小破・浸水」がレベルCと概ね対応すると考えられる。松富ら(1994)によれば、「小破・浸水」は、家屋で木造の場合、概ね1.5m以下で生じるとの指摘があり、その指摘は、本調査によるレベルCの場合で、かつ図-6に示される建築基準法改正前と判定されるものの比較的新しい家屋の場合と建築後数十年オーダーの古民家の場合(図-6中△・□印)に対応すると考えられる。これら検討結果は、家屋被災レベルの低減のための今後の地盤の嵩上げ高さの指標決定に寄与するものと考えられる。

4. おわりに

東北地方太平洋沖地震で被災した海岸林の津波に対する防備効果について検討した結果、得られた結論は次のとおりである。

1) 海岸林植栽の始まりは、主に「風害・潮害防備」で

あり、1600年以降、仙台藩などの「公」によって実施された。そして、当該地震津波に至るまでの400余年にわたり幾重にも当該地震による津波高よりも低い津波の来襲があったこと、また、さらなる植栽が地域住民によって精力的に行われてきたことから、海岸林に津波防備効果が存在したことを再確認した。

2) 当該地震発生以前の約100年間を地形図と空中写真によって変遷を分析し、海岸林がほぼ倒伏・流失した場所が、津波高、海岸堤防の有無による影響だけでなく、表-1に示すように周辺の土地利用改変、および砂地盤であったことが影響していることを指摘した。

3) 家屋の破壊レベルを3つに分類し、その中でも、家屋が浸水したものの破壊は免れている家屋(レベルC)が現れる場合に注目して、仙台平野地域を対象に、海岸線からレベルCの家屋が現れる最初の位置までの距離 X_c と林帯幅 W_F との関係を示した。

4) 家屋の破壊レベルと浸水深との対応について、レベルCとなる場合には最大値の範囲が1.0～3.5mになることを明らかにし、さらに、家屋の新旧によってその浸水深に0.5m～1.0m程度差があることを明らかにした。

謝辞: 本研究は、日本大学総長特別研究助成および日本大学理工学部復興支援研究プロジェクト(復興まちづくり)、(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業の一環で実施致しました。また、空中写真については国土地理院の国土変遷アーカイブスを、地形図については時系列地形図閲覧ソフト「今昔マップ」(谷謙二氏作成)を利用いたしました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 後藤 浩・他4名(2012): 東北地方太平洋沖地震津波における海岸保安林の効果および被災に関する現地調査, 土木学会論文集(B2: 海岸工学), 土木学会, 第68巻2号, pp.1366-1370.
- 日本緑化センター(2009): 日本の松原物語-海岸林の過去・現在・未来を考える(http://www.pinerescue.jp/jiten/matsu/books/m_story/).
- 山元町(1998): 海岸林(官林)物語資料, 山元町歴史資料館所蔵.
- 小林富士雄(2011): 海岸林津波被害の記録に学ぶ, Green Age(7月号), 日本緑化センター, pp.40-44.
- 首藤伸夫(2011): 三陸地方の津波の歴史(<http://www.coastal.jp/>).
- 国土交通省東北地方整備局(2011): 「被災3県の海岸堤防高の設定状況」HP(www.thr.mlit.go.jp/).
- 原口 強・岩松 暉(2011): 東日本大震災津波詳細地図上巻および下巻, 古今書院.
- 首藤伸夫(1992): 津波強度と被害, 東北大学津波工学研究報告, 第9号, pp.101-139.
- 松富英夫・首藤伸夫(1994): 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 土木学会, 第41巻, pp.246-250, 1994.
- 東京新聞(2011): 「4メートル津波木造建物全壊」記事(7/2夕刊)