海岸林に残される津波痕跡過程と減災効果に関する研究

Tsunami Traces Found in a Coastal Forest and Disaster Mitigation Effects of Trees

仲座栄三¹・稲垣賢人²・駒場悠輔³・入部綱清⁴

Eizo NAKAZA, Kento INAGAKI, Yusuke KOMABA and Tsunakiyo IRIBE

The huge tsunami that struck the Tohoku region in March 2011 necessitated a reevaluation of our current understanding of the disaster-mitigating effect of coastal forests on tsunamis. In tsunami disaster studies, the height of a tsunami is often estimated based on the traces left on the trees within the coastal forest areas; however the accuracy of these estimated values is not clear. In this study, experiments are conducted to investigate in detail the changes in inundation depth accompanying tsunamis that enter coastal forest areas. The results show the effects of coastal forest trunks, trunks coupled with the presence of foliage, and a coastal forest core coupled with surrounding thick undergrowth on tsunamis. This study finds that tsunami traces left in coastal forest areas do not necessarily reflect the height of the tsunami.

1. はじめに

津波に対する海岸林の減災効果については、数多くの研究が行われており（中野ら，1966；首藤，1985；原田ら，2000），それらの成果は実際の植林施工にも適用されてきた。しかし，3.11東北地方大津波災害は，大規模津波に対する海岸林の効果を，さらに詳細に検討しなければならないことを教えている（稲垣ら，2012；前川ら，2013；土屋，2013；久保田ら，2013）。

大津波発生の後，現地にて行われた調査などにおいては，災害状況と共に，木々や家屋などに残された痕跡から，進入津波高などが明らかにされた（土木学会海岸工学委員会HP，2012）。

木々に残された津波痕跡などは，来襲した津波規模を推定する上で非常に重要な情報であるが，それが津波のいかなうな状況を表すものであるかなどについては必ずしも定かでない。

また，大規模津波によって，海岸林のほとんどがなぎ倒された状況などから，それがどのような津波の作用で生じたものであるかを明らかにする必要性も出てきた（稲垣ら，2012）。

本研究では，このようなことを明らかにするため，海岸林の存在により，来襲津波が海岸林の作用でいかなうな変形を受け最大浸水深に至るのか，結果として津波痕跡はいかなうな津波の状況を表すのか，来襲津波規模と海岸林背後域における浸水深との関係などを明らかにした上で，海岸林による減災効果を明らかにする。

2. 実験装置及び方法

実験では長さ11m，幅0.6mの開水路を用いた（図-1）。開水路長のはほぼ中心付近に海岸林のモデルを設置（6cm×6cmの格子状に配置）した。海岸林モデルを図-2に示す。実験に用いたモデルの長さに対する縮尺は1/100であり，相似則にFroude則を適用している。

海岸林としては，現地調査結果（久保田ら，2013）を参照に，樹種に松の木を想定した。松の木の幹部は，直径5mm・高さ15.5cmの高さの鉄製釘でモデル化した。したがって，モデルで用いた海岸林の幹の高さは，現地スケールで約15m，幹の直径は一律50cm，林帯の幅（岸から陸側に向けての幅）は，およそ120mに相当する。

図-1の左端にある貯水槽に静かに水を貯め，ゲートを瞬時に取り去ることで発生する段波を，入射津波として用いた。貯水槽に蓄えた水の平均水深は，10cm，15cm，18cm，20cm，25cm，28cm，30cmと変化させた。

図-1 実験装置

図-2 海岸林モデル及び水位測定位置

1 正会員	工博	琉球大学教授工学部 環境建設工学科
2		琉球大学大学院理工学研究科 生産エネルギー工学専攻
3 フェロワー		株式会社 国場組
4 正会員	工博	琉球大学助教工学部 環境建設工学科

これに対応して、海岸林帯の直前で測定された入射津波高の平均値は、それぞれ2cm, 3cm, 3.8cm, 4cm, 5cm, 5.8cm, 6cmであった。水位の測定には容量式波高計（ケネック社製）を用いた。図-2に、開水路の中央線上に設置した波高計の設置位置をCh.1～14で表す。流速の測定には、超小型プロベラ式流速計（中村製作所製）を用いた。流速の測定は、図中のCh.1及び14の位置で行った。水位及び流速共に、データサンプリングは100Hzである。

実験では、津波発生に伴う入射津波高の差異の影響を取り除くため、各実験ケースに対して3回実験を行い、それらから得られるデータの平均値を以て浸水深など、津波減災効果に対する諸量を求めた。

実験ケースとしては、海岸林モデルを設置せずに水平床のみとしたケース（水平床）、高さ15mの幹部を有する海岸林の幹部のみをモデル化したケース（幹部のみ）、その幹部モデルの上半分に枝葉が存在する場合を想定した枝葉付モデルのケース（幹部+枝葉）、これに対応して幹部モデルの下半分に低木等が繁茂する場合を想定したケース（幹部+低木）からなる。その内、幹部+枝葉のケース及び幹部+低木のケースは、それぞれ枝葉や低木の密度が高い場合（密）と低い場合（疎）からなる。

幹部+枝葉、幹部+低木、などのケースについては、直径0.5mmのワイヤー（0.42mm×0.42mmメッシュ）でできた銅製網（高さ6.0cm、幅60cm）を、幹部として用いた鉄釘の横列に6cm縦間隔で張り付けた。枝葉や低木の密度による影響を調べるため、その銅製網を一重あるいは二重にして張り付けた場合について実験を行った。

銅製網を一重にした場合の枝葉面積の面積占有率は36.8%であり、二重にした場合の占有率は60.8%であった。なお、幹部のみによる面積占有率は7.5%であった。

3. 実験結果及び考察

図-3 (a) ～ (e) に、定常流に及ぼす海岸林帯の影響を示す。この場合の流量フラックスは、いずれのケースにおいても $q=3.62 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ である。

これらの図において、2本の破線は幹部の上半部に枝葉として銅製網を設置した範囲を表している。開水路の床面は、横軸上に対応させられる。図中、床面が台形上に盛り上がっている部分は、海岸林帯内に当たり、海岸林モデルを設置するために、開水路床に設置した厚さ約1cmのベニア板の存在を表している。

実験で与えた流量フラックスに対する限界水深は、 $h_c=5.1\text{cm}$ であり、いずれの実験ケースにおいても、流れは海岸林帯の後端で限界水深を取り、常流から射流へと遷移する流れを示している。

海岸林の幹部の存在は、定常流れに抵抗として働き、

図-3 定常流に対する海岸林帯の影響

写真-1 宮城県名取沿岸を襲う3.11大津波(共同通信社)

流れはその抵抗に打ち勝って流れなければならず、急な水面勾配を形成させている。幹部の上半部に枝葉モデルを設置することで、水面はさらに急な勾配を形成させている。海岸林帯よりも上流域では堰上げ背水（水理学で定義されるH2曲線）によって徐々に水位が高まり、最高水位は林帯のフロントよりも50cmほど上流に離れて現れている。

幹部の上半部に枝葉モデル取り付けの場合と、それを下半分に低木として取り付け場合とのケースを比較してみると、前者のケースでは上流域から海岸林帯の後端まで一様に低下する水面勾配を示しているのに対し、後者のケースでは、海岸林帯の流端付近で極端に落ち込む急な水面勾配が現れている。

こうした水面勾配の違いは、幹部の上半分に取り付けられた枝葉モデルが水表面付近の流れを遮り、それを底面付近へと押しやるのに対して、低木の作用は、底面付近の流れを遮って、表面付近へと押しやることに基づいているものと判断される。

写真-1は、3.11大津波の際に宮城県名取市沿岸の林帯を通過する津波の様子を示している。この写真によると、図-3 (d) あるいは (e) に見られる海岸林帯後端の極端な水位の低下を捉えているのではないかと推測される。

図-4 (a) ~ (d) に、津波伝播に伴う浸水深の時間変化を示す。入射津波高は6.0cmである。縦軸は各測定点で得られた浸水深を表すが、上流からの距離に応じて水位のゼロ点をシフトさせていることに注意を要する。横軸は、経過時間を表す。

図-4 (a) に示すように、水平床のケースにおいては、津波段波が時間と共に一様に伝播している。これに対し、津波が林帯内で海岸林の幹部の作用を受けるとき（図-4 (b)、幹部のみのケース）、津波の先端部は波速を若干落としながら林帯を通り抜けている。5.5s付近から反射波が形成され、津波の一部は、沖側へと伝播している。海岸林の幹部の上半部に枝葉密を有する場合、反射波の発生が早まっている。

流れと逆方向に長波の伝播が許されるのは、フルード数が1以下の場合に限られる。したがって、反射波の伝播が開始される時点で、フルード数は1以下となっているものと判断される。

図-4 (d) においては、津波先端部が海岸林帯に突入すると同時に、低木の遮蔽作用によって水位の極端な高まりが形成され、その水位の高まりが結果としてフルード数を1以下に下げ、その瞬間から反射波の伝播が可能となったものと判断される。

これらの現象をさらに詳細に調べるため、津波段波の先端が海岸林帯に到達直後から林帯を通過するまでの間の浸水深の縦断方向分布の時間変化を、図-5 (a) ~ (d)

図-4 津波段波の伝播に伴う浸水深の時間変化

に示す。

図中には、海岸林帯がなく水平床のみのケース、海岸林の幹部のみの津波に対して作用するケース、幹部+上半部枝葉疎のケース、幹部+低木疎のケースについて比較している。枝葉や低木の密度の疎密の効果については、それほど大きな差異が現れないことから、ここでは紙面の都合により提示を割愛した。

図-5 (a) に示すように、海岸林の抵抗による流れの減速により、海岸林帯の先端部付近には局所的な水位の高まりが生じ、それが跳水現象を形成させる。跳水の位置は、幹部のみのケース、幹部+上半部枝葉疎のケース、幹部+低木疎のケースの順に上流側で現れている。

図-4に示す津波の伝播位相と合わせて検討してみると、水平床のケース、海岸林幹部のみのケース、幹部+上半部枝葉のケースのいずれの場合も、2.0sの時点で津波先端部は海岸林帯後端に達している。このとき、いずれのケースも浸水深は4.0cm程度となっており、非定常時の限界水深に対応しているものと推定される。その結果、海岸林帯内には常流が形成されているものと判断される。

海岸林の幹部に加えて低木疎とした場合については、津波先端が海岸林帯の後端に達するのは、3.0sとなっている。同時に、反射波の伝播も開始している。その他のケースにおいては、図-4に示す津波の伝播位相に見るように、反射波の伝播はほぼ5.0sで発生している。

低木疎を伴うケースについて、1.5sから3.5sまでに引き起こされる跳水の発生及び反射波の発生の様子を写真-2 (a) ~ (c) に示す。津波が海岸林帯に突入する際に、飛沫を伴う激しい水流の打ち上げが生じている。この時の水位のピークは、入射津波高の2倍を超える。その後も海岸林帯内の水位の上昇は続き、2.5sの時点で林帯内の水位は入射津波高の2.5倍に達している。

海岸林の存在や低木の存在は、流れにブレーキを与え、その結果として水位は林帯内で上昇を重ね、林帯内に貯

図-5 津波段波の伝播に伴う浸水深の時間変化

(a) T = 1.5 s

(b) T = 2.5 s

(c) T = 3.5 s

写真-2 幹部+低木疎のケースにおける砕波と反射波の形成

痕跡から推定される浸水深から海岸林帯に來襲した入射津波の津波高を推定することは容易でない。このことは、これまでの議論から明らかである。

現地観測等で測定される津波痕跡値は、実際に津波のおおよその浸水深に対応することは、図-5などからも理解される。しかし、入射津波の津波高については、海岸林帯内に遺される痕跡から推定するよりもむしろ、海岸林帯後端付近に現れる痕跡などから推測の方がより良いことが示唆される。図-5に示す結果は、入射津波が海岸林帯に射流状態で突入する場合に適用される。しかしながら、本実験で対象とするような大津波の場合については、そのほとんどが、海岸林帯の前面に広がる海岸上で砕波に至り、津波は海岸林帯に射流状態で突入することが想定される。したがって、図-5の適用は、妥当なものと判断される。最後に、各ケースに対して、海岸林帯を通過後の透過波がもたらす浸水深及び水量の比較を行い、海岸林帯による津波減災効果を検討する。

図-6に、海岸林帯背後のCh.14の位置で測定した浸水深の比較を示す。図示のとおり、浸水深は、海岸林の幹

留システムが形成される。流れが海岸林帯を抜けると、流れにブレーキをかける作用がなくなり、海岸林帯内の高い水位状態からダムブレイク的な流れが形成される。

3.11大津波後の災害調査の際には、海岸林帯内に残存した海岸林の幹部や枝葉などに遺された津波痕跡等を手掛かりに、そこに生じた浸水深などが測定された。こうした浸水深を基に、当時來襲した津波の高さが推測されている（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる速報値，2012）。

表-1 海岸林帯通過後の津波による総輸送流量の比較(m³)

入射津波高	水平床	幹部のみ	幹部+枝葉疎	幹部+枝葉密	幹部+低木疎	幹部+低木密
6.0cm	0.329	0.245 (25.5%)	0.218 (33.7%)	0.226 (31.3%)	0.141 (57.0%)	0.121 (63.2%)
4.0cm	0.217	0.135 (38.0%)	0.135 (38.0%)	0.132 (39.3%)	0.074 (65.9%)	0.059 (72.7%)
3.0cm	0.094	0.033 (64.2%)	0.033 (64.2%)	0.033 (64.2%)	0.018 (80.0%)	0.016 (82.9%)

部のみが津波に作用する場合、幹部+枝葉疎・密の場合のいずれにおいても、浸水深は海岸林の存在しない水平床の場合の浸水深とほぼ同じ値を示している。

これらのケースに対して、海岸林の幹部に加えて低木を考慮したケースでは、有意な到達時間の遅れを示すと共に、浸水深の低減も大きい。低木密度が高いケースでは、水平床のケースで得られた最大浸水深の6.5割ほどまで低減している。

表-1に、海岸林帯を透過し、Ch.14の位置に到達した津波が輸送した流量を、全ての実験ケースについて比較する。表中の（）内に示す数値は、水平床のケースで得られた流量と比較して何%低減させたかを表している。

津波に海岸林の幹部のみが作用する場合について、入射津波高が小さい場合（H=3.0cm）については、流量を64.2%も低減させている。これに対して、津波高が高いケース（H=6.0cm）については、効果は下がり25.5%となっている。海岸林の幹部のみが津波に作用する場合、大津波に対する減災効果は低くなることを示唆している。

一方、海岸林の幹部に加えて低木の効果を考慮したケースでは、H=6.0cmとなる大津波に対しても、63.2%の低減効果を発現している。さらに、H=3.0cmの津波に対しては、低減効果は約83%にも達している。したがって、海岸林を津波に対して効果的に作用させるためには、松のような背の高い海岸林に加えて、津波に強い耐性を有する低木などの植林が必要であることが推奨される。今後、松の木のような高木が津波耐性を有するための技

術開発、さらに高木の下で低木を繁茂させる技術の開発が急がれる。

4. おわりに

実験によって海岸林帯に侵入する津波の特性について明らかにした。その結果、海岸林帯内に遺される津波の痕跡の解釈に注意が必要であることが示された。また、海岸林の幹部、枝葉、そして低木等の存在が、津波に及ぼす影響が調べられた。これらの結果から、最大浸水深の違い、輸送される流量の比較が行われ、海岸林帯の津波に対する減災効果が明らかにされた。

謝辞：本研究の一部は琉球大学島嶼防災研究センターの研究補助を受けている。また、尾崎次郎奨学基金の助成を受けている。ここに記し、心から感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 稲垣賢人・仲座栄三・入部綱清・渡辺康志（2012）：東北地方大津波によって引き流された仙台市沿岸の松の木の分布特性，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.68, pp.120-125.
- 久保田 徹・仲座栄三・稲垣賢人・Rusila Savau・Mostafizur Rahaman・入部綱清（2013）：海岸丘と海岸林の複合作用が津波に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69, No2 pp.I_301-305.
- 首藤伸夫（1985）：防潮林の津波に対する効果と限界，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 465-469.
- 土屋十圀（2013）：防潮林と消波工の一体型水理実験—東日本大震災巨大津波による防潮林調査—，自然災害，J. JSNDS 32-3, pp. 349-259.
- 土木学会海岸工学委員会HP（2012）：東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる速報値。
- 中野芳章・森沢万佐男・菊谷昭雄（1966）：防潮林の効果と幅に関する一実験，林業試験場研究報告，第194号，pp. 155 ? 166.
- 原田賢治・油屋貴子・Latief Hmzah・今村文彦（2000）：防潮林の津波に対する減災効果の検討，海岸工学論文集，第47巻，pp. 366-370.
- 前川敏明・二瓶泰雄・中田遥香（2013）：海岸砂丘・盛土による津波減衰効果の検討，土木学会論文集B1（水工学），Vol.69, pp.I_1453-I-1458.

図-6 海岸林帯背後の浸水深比較