

沿岸で生じた流木の内陸樹林帯による捕捉機能と限界に関する実験的研究

埼玉大学 学生会員 ○山崎 直樹

埼玉大学大学院 非会員 Rowan Sachika De Costa

埼玉大学大学院 学生会員 五十嵐 善哉

埼玉大学大学院 (兼) 埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター 正会員 田中 規夫

1. 背景及び目的

東北地方太平洋沖地震津波は人や建物のみならず、海岸林にも甚大な被害を及ぼした。海岸林には減災効果があるものの、樹木が破壊により流出すると、その背後地にある家屋等に流木が衝突する危険性がある。Tanaka & Ogino¹⁾は、仙台平野の被害事例において流木の衝突力は、樹林帯による津波の流体力減少量よりも小さいことを示しているが、樹林帯による減災効果をより高めるためには、流木が背後地に侵入することを防ぐ必要がある。

樹林帯には、背後地の流体力を減少させる効果に加えて、漂流物を捕捉することが震災後の現地調査でも確認されている。五十嵐ら²⁾は、レベル2津波が発生した場合の北海道大樹町での海岸林(カシワ・グイマツ)の樹木破壊状況について数値解析により示した。その結果、胸高直径が太く、沖から離れた樹木に関しては、流木化せずに捕捉効果が期待されることを示した。

本研究では、津波により沿岸の海岸林が破壊されて流木が生じた場合に、流木を捕捉するのに効果的な内陸樹林帯に関する知見を得ることを目的とする。流木としては実樹木を用いた水理模型実験を行った。特に、流木を捕捉するために必要な最低限の樹林帯密度・樹林帯列数および、流木を捕捉したことにより内陸樹林帯が破壊されないための限界胸高直径を明らかにする。

2. 流木捕捉実験の概要

(1) 実験水路の概要

本実験では、長さ 14 m、幅 0.5 m の矩形断面を有する循環式開水路を用いた(図-1)。水路内に 1/1000 勾配の固定床と樹林帯モデルを設置し、実験を行った。本実験では実験の縮尺としてフルード相似則を適用し、長さスケールの縮尺が 1/20 になるように設定した。

(2) 使用した流木モデルおよび樹林帯モデル

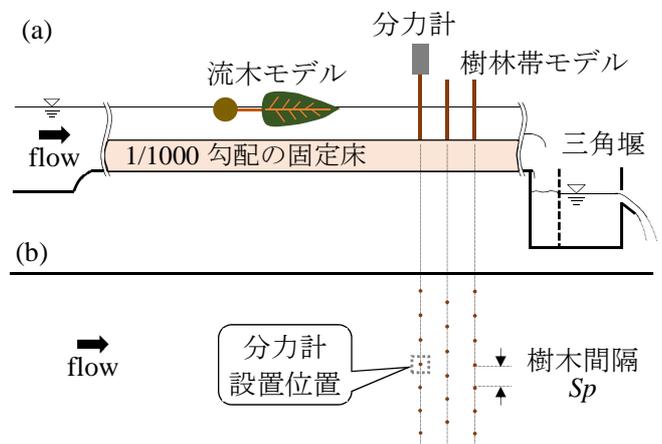


図-1 各模型の設置状況, (a)縦断面図, (b)平面図



図-2 使用した流木モデル(コニファー)

a) 流木モデル(コニファー)

本実験では、流木モデルとして実樹木(コニファー)を用いた。樹木サイズは、図-2に示すように樹高約 37 cm、樹冠幅約 8 cm、根鉢直径約 7 cm、幹直径約 1 cm ほどである。五十嵐ら²⁾は枝下高が樹木の破壊状況に影響することを示している。そのため、流木モデルの枝下高(h_{trunk})は 2.25, 4.5, 6.75 cm の 3 ケースを実施した。また、流木の個体差を見るため、2本の異なるコニファーで実験を行い比較した。

流木の投入位置については、流木が加速するのに十

キーワード 流木, 衝突力, 集積力, 海岸林, 捕捉

連絡先〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学 TEL048-858-3564 E-mail: tanaka01@mail.saitama-u.ac.jp

分な距離として樹林帯 1 列目から 200 cm 前方の場所とした。本実験において、流木モデルは樹冠が下流側として、流れと樹木が平行になるように投入した。

b) 樹林帯モデル

流木モデルを捕捉することを目的とした樹林帯モデルは、破壊を防ぐため、それ自体に加わる流体力を小さくする必要がある。そのため、樹林帯モデルの枝下高は十分に高くすることを想定し、幹部のみが浸水するとして直径 1 cm の円柱でモデル化した（実スケールで 20 cm）。また、全ての実験ケースにおいて樹林帯モデルは抽水状態である。

樹林帯モデルは、流木モデルの捕捉に必要最低限の設置を考えるため、樹林帯列数は 1, 2, 3 列の 3 ケースを実施した。樹林帯間隔については、北海道大樹町のグイマツの樹木密度は $Sp/D=22.1$ であった。ここで、 Sp は樹木間隔（図-1）、 D は樹木直径(1cm)である。樹林帯モデルは多くても 3 列としているため、より密な配置でも樹木が育つ可能性がある。そこで、大樹町の Sp/D よりも密な、 $Sp/D=14.5, 7.0$ についても実験を行った。また、2 列、3 列と列数を増やす場合は、図-1 に示すように千鳥配列とした。

(3) 実験ケース一覧および計測内容

本実験における流量は、流木モデルの根鉢が床を引きずるケースと、完全に浮遊するケースの 2 ケースとして、 $Q=7.5 \times 10^{-3}, 16.7 \times 10^{-3} [\text{m}^3/\text{s}]$ とした。 $Sp/D=22.1$ で 1 列の場合、樹林帯モデル前後のフルード数は、流量が $Q=7.5 \times 10^{-3} [\text{m}^3/\text{s}]$ のときそれぞれ 0.41, 0.46 であり、流量が $Q=16.7 \times 10^{-3} [\text{m}^3/\text{s}]$ のときそれぞれ 0.51, 0.56 である。以上の各ケースにおいて、10 回繰り返して実験を行った。実験ケース一覧を表-1 に示す。

図-1 に示すように、樹林帯モデルの 1 列目の中央の部分について、分力計 (10N 分力計 SSK LB60-10N) を設置し、流体力、衝突力、集積力を計測した。流量は、水路の後方に設置されている三角堰により計測した。流木の速度は水路上部に設置したカメラで撮影した動画より計測したが、流速とほとんど同じであったため、流木の衝突力の計算における流木速度は流速を用いた。

(4) 樹林帯モデルに働く力

a) 衝突力

流木の衝突力の計算は宮原ら³⁾と同様とした。流木（質量 m [kg]）と樹林帯モデルの衝突は完全非弾性衝突と仮定し、衝突力 F [N] は下記の力積式により求めた。

$$(C_i C_m) m V = F \Delta t \quad (1)$$

ここに、 C_i, C_m はそれぞれ内部摩擦係数、付加質量係数である。 V [m/s] は衝突直前の流木速度（流速と同じとした）、 Δt は衝突時間である。

b) 集積力

流木モデルが樹林帯モデルに捕捉されたのちに、継続して働く力を集積力と分類した。集積力は、流木の捕捉により増加した投影面積に加わる流体力分と考え、以下の計算式により求めた。

$$F = \frac{1}{2} \rho u^2 \frac{1}{h} \int (C_d(z) A(z)) dz \quad (2)$$

ここに、 $C_d(z)$ は樹木の各高さにおける抵抗係数であり、樹冠の C_d は「河川における樹木管理の手引き」⁴⁾ を参考に 0.7 とした。また、幹は円柱として $C_d=1.0$ とし、根鉢は投影面積に対して 5 割程度の流体が根鉢内部を通過する考え、 $C_d=0.5$ とした。 ρ [kg/m³] は水の密度、 u [m/s] は流速、 $A(z)$ [m²] は根鉢、幹、樹冠の投影面積である。

3. 実験結果と考察

(1) 捕捉タイプ分類

実験結果から捕捉タイプを図-3 のように 5 つに分類した。Type-0: 流木モデルが捕捉されずに通過、Type-1: 樹冠（枝）部分が樹林帯模型に刺さり止まる形、Type-2: 根鉢が樹林帯模型に引っ掛かり止まる形、Type-3: 樹冠や根鉢が直接的な原因でなく、流木全体が樹林帯モデルで斜めの形で止まる形、Type-4: 樹冠が 1 列目に衝突し樹冠の先端を支点として回転し、流れに対して横向きに止まる形とした。

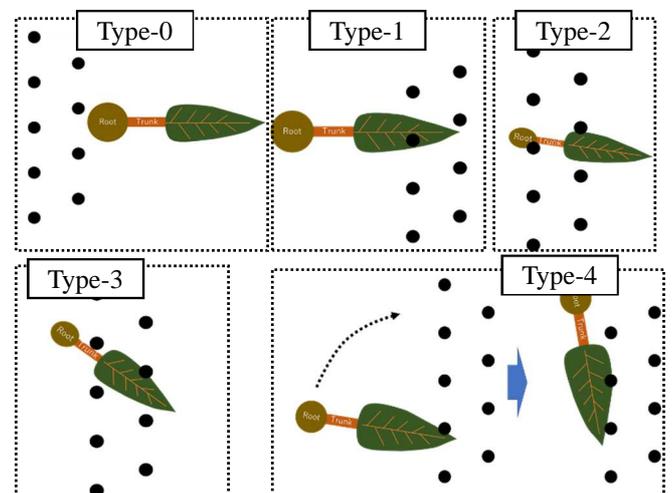


図-3 流木の捕捉タイプ一覧

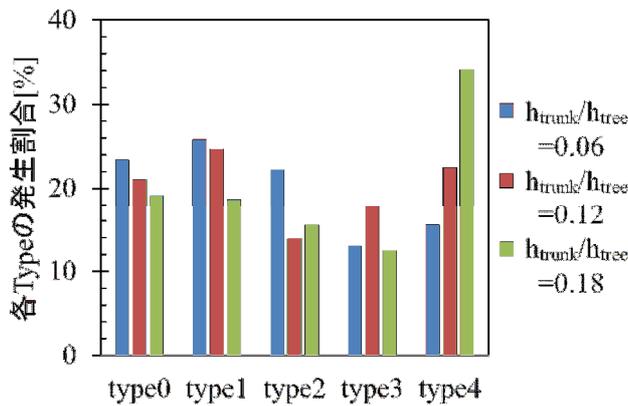


図-4 流木の枝下高が捕捉タイプ割合に与える影響

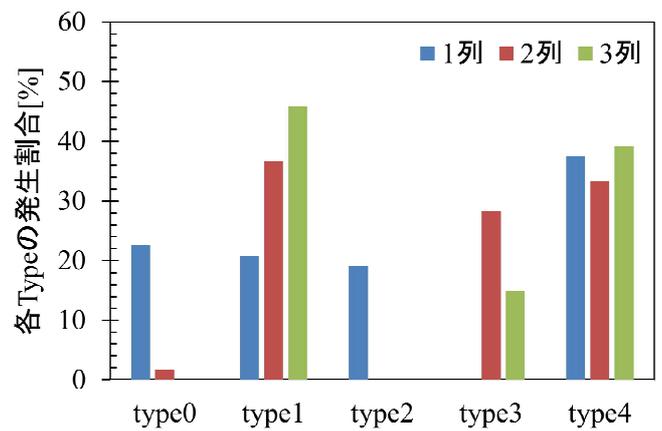


図-6 樹林帯の列数が捕捉タイプ割合に与える影響

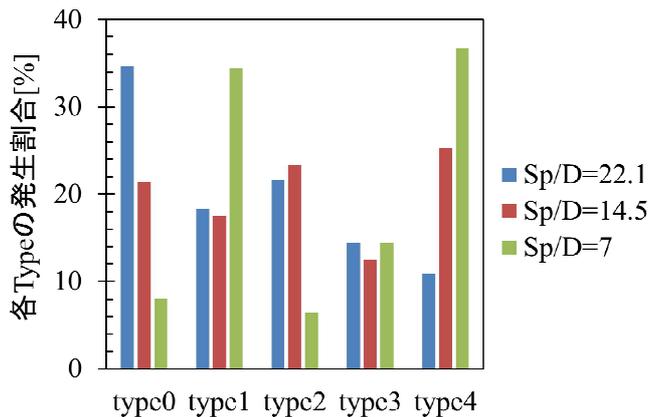


図-5 樹林帯の密度が捕捉タイプ割合に与える影響

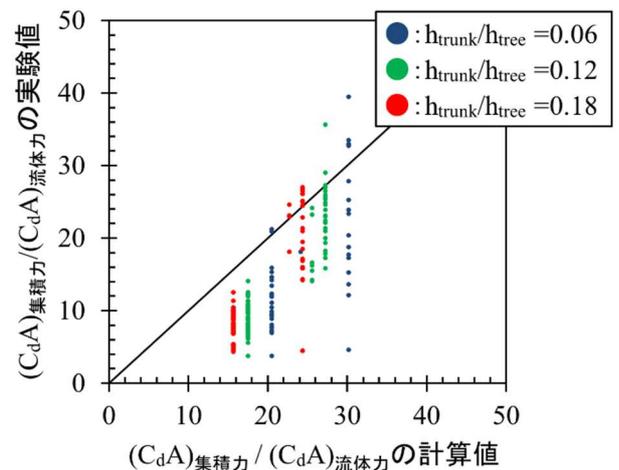


図-7 樹林帯に加わる流体力と集積力の C_dA の比

(2) 各捕捉 Type の発生割合

各パラメータ（流木モデルの枝下高，樹林帯モデルの密度・列数）が各捕捉 Type の発生割合に与える影響について図-4 から図-6 に示す。

a) 流木の枝下高が捕捉タイプ割合に与える影響

流木モデルの枝下高 h_{trunk} による捕捉タイプ割合への影響を考察するため，樹高 h_{tree} と枝下高 h_{trunk} の比 (h_{trunk}/h_{tree}) が 0.06, 0.12, 0.18 の場合について，各捕捉タイプの発生割合を図-4 に示す。

Type-0 の発生割合を $h_{trunk}/h_{tree} = 0.06, 0.18$ で比べると，23.3, 19.2% とわずかな減少が見られた。これは， $h_{trunk}/h_{tree} = 0.06$ の方が，樹冠が大きいためと考えられる。Type-4 の発生割合を $h_{trunk}/h_{tree} = 0.06, 0.18$ について比較すると，15.6%，34.2% と 2 倍以上の割合に増加した。これは，枝下高が高いと，重心位置が高くなり回転しやすくなるので，Type-4 の割合が増加したと考えられる。

b) 樹林帯の密度が捕捉タイプ割合に与える影響

樹林帯モデルの Sp/D による影響について図-5 に示す。樹林帯が密 ($Sp/D = 7.0$) なほど，流木が樹林帯を通過する割合 Type-0 は低下していることが分かる。しかし， $Sp/D = 7.0$ のときは樹林帯の樹木間隔が流木モデルの樹

幹幅（約 8 cm）より小さいにもかかわらず，Type-0 の割合が 0 になっていない。これは，枝が樹林帯に深く刺さらないと，その柔軟性により通過してしまう場合があるためである。また， $Sp/D = 7.0$ の場合，Type-2 の割合が減少し，Type-1, Type-4 の割合が増加した。これは，1 列目の樹林帯と 2 列目の樹林帯の間隔が 3cm と樹冠幅（約 8 cm）よりも小さくなったことから，根鉢で捕捉される前に，樹冠部で捕捉される確率が増えたことが原因と考える。

c) 樹林帯の列数が捕捉タイプ割合に与える影響

樹林帯モデルの列数による影響について図-6 に示す。 $Sp/D = 7.0$ の場合，1, 2, 3 列で Type-0 の発生割合を比べると，22.5%，1.7%，0% であった。これより， $Sp/D = 7.0$ で 2 列以上であれば十分に流木の捕捉効果を有することが示唆された。

(3) 衝突力と集積力について

衝突力に関しては，Type-2 で最大となり，集積力は Type-4 で最大となった。Type-2 は根鉢が衝突するため，樹冠部分で衝突する Type-1 よりも衝突時間が短いため，

衝突力が最大になったと考えられる。集積力は、流木の捕捉による C_dA の増分が影響すると考えられるため、流れに対して垂直に捕捉される Type-4 で最大となった。また、樹冠が大きい、すなわち枝下高が低いほど集積力は大きい。ここで、式(2)より計算した集積力の C_dA を流体力の C_dA で除した値と実験結果より算出した集積力の C_dA を流体力の C_dA で除した値の比較を図-7に示す。ここで、樹冠の投影面積は写真より計測し、樹冠長さ×樹冠幅の0.7倍とした。これより、集積力は、流木の捕捉による C_dA の増分であることが確認された。

(4) 捕捉側樹林帯の限界胸高直径 $d_{BH-critical}$

流木を捕捉する樹林帯が衝突力や集積力により破壊されないための限界胸高直径を検討する。衝突力と集積力によるモーメントを実験スケールから実スケールに変更し、Tanaka⁴⁾の示す破壊限界モーメント M_{bc} [MN]と比較し、破壊されないための限界胸高直径 $d_{BH-critical}$ を算出した。 $d_{BH-critical}$ の算出において、内陸の樹林帯であることから、フルード数は0.6, 0.9として計算した。実スケールの集積力の計算には $(C_dA)_{集積力}/(C_dA)_{流体力}$ の値を用いるが、樹林帯を密($Sp/D=7.0$)とした場合、流木を2本以上で捕捉するため、1本あたりに働く集積力は小さくなる。そのため、 $(C_dA)_{集積力}/(C_dA)_{流体力}$ は枝下高によらず10程度であった。図-8に衝突力が最大となる Type-2 と集積力が最大となる Type-4 について、 $d_{BH-critical}$ と水深 h の関係を示す。Tanaka & Ogino¹⁾で論じられているのと同様に、衝突力よりも集積力の影響が大きいことが分かる。また、内陸においても水深3.0m程度のフルード数0.9程度の大規模な津波の場合、流木を捕捉する樹林帯が破壊されないためには、胸高直径が50cm程度必要である。ただし、沿岸の海岸林等によりフルード数を0.6程度まで減衰させることができれば、胸高直径が35cm程度の樹林帯は破壊されない。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 内陸樹林帯は、樹木間隔が流木の樹冠幅と同程度で、かつ2列以上の千鳥配列であれば十分な捕捉機能を発揮する。
- 2) 捕捉側の樹木に働く力については、流木の衝突力よりも捕捉されたことによる C_dA の増加に伴う集積力の方が大きい。

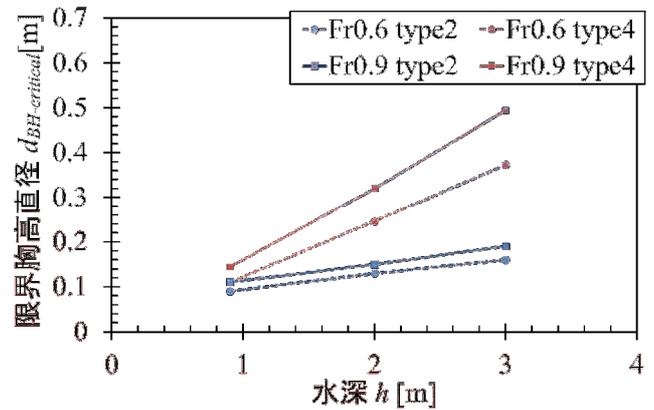


図-8 水深・フルード数と限界胸高直径の関係

- 3) 枝下高が低い方が、集積力の大きくなる Type-4 の発生割合が減少する。そのため、沿岸の樹林帯は枝下高を低くし、流体力の減少効果を高くする方が減災効果だけではなく、流木化した場合に捕捉されやすい。
- 4) 内陸樹林帯が流木の衝突力および集積力で破壊されないための限界胸高直径を示した。

謝辞 本研究の一部に、科学研究費補助金基盤研究 B (No.15H02987, 代表: 田中規夫) を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Tanaka, N., Ogino, T., Comparison of reduction of tsunami fluid force and additional force due to impact and accumulating after collision of tsunami-produced driftwood from a coastal forest with houses during the Great East Japan tsunami, Landscape Ecol. Eng., 2017. 13: 287. <https://doi.org/10.1007/s11355-016-0321-7>
- 2) 五十嵐善哉, 君和田祐弥, 赤崎佑太, 田中規夫, 佐藤創, 津波規模が海岸樹木破壊形態に及ぼす影響の樹種による相違, 土木学会関東支部発表会 II-7(CD-ROM), 2017.
- 3) 宮原海, 伏見健吾, 山崎直樹, 田中規夫, 樹冠・根鉢つき流木が家屋に衝突する際の流体力に関する付加質量力について, 土木学会関東支部発表会 II-41(CD-ROM), 2017.
- 4) (財)リバーフロント整備センター編: 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp.154-171, 1999.