

## 津波時に堤外地樹林帯で発生した流木の堤内地侵入割合に関する実験的研究

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による壊滅的被害を受けて、数百年から千年に1回の頻度で発生し、その地点で想定される最大規模の津波（レベル2津波）が設定された。このレベル2津波に対する減災機能を高めるため、ソフト・ハードの施策を組み合わせた多重防御が推進されるようになった<sup>1)</sup>。このような流れの中、多重防御に関する研究が行われ始めた。

海岸林による津波の減勢効果については古くから知られている（例えば首藤，1985）が、五十嵐・田中(2016)<sup>2)</sup>（以後、前報<sup>2)</sup>と呼ぶ）は海岸堤防と海岸林を組み合わせた水理実験を行い、堤外地に配置したわずか2列の海岸林でも越流量を減少させることを示した。しかし、堤外地に配置した樹木は、規模の大きい津波時には、幹の破断や洗掘による生育基盤消失が発生し、流木化する危険性が高い。この流木が堤防を越流した場合、家屋等に衝突し2次被害を与える可能性もある。一方で、岩手県大槌町の浪板海岸では、海岸堤防前面の海岸保安林が津波により破壊され流木化したものの堤内地側への侵入がほとんど確認されなかった（ヒアリングより）。これは、海岸林特性や流木化のタイミングによっては、流木が堤防を越流せず堤外地側にとどまる可能性があることを示唆している。そこで本研究では、海岸堤防前面で流木化した樹木の堤内地側への侵入に影響する要因を明らかにする。

## 2. 水理模型実験の概要

## (1) 実験水路の概要

空圧式造波ゲートの急開により段波を発生させられる、幅0.4m、長さ18mの実験水路を使用した。水路内にはゲートから4.5mの位置から勾配1:10のスロープを0.5m、その背後は水平となる実験床を設置した。実験の縮尺にはフルード則を適用し、長さの縮尺を1/100とした。木製の堤防模型は、幅：0.4m、堤防高 $Z_E$ ：6.2cm、天端長さ：4.0cm、法面を2割勾配とした。

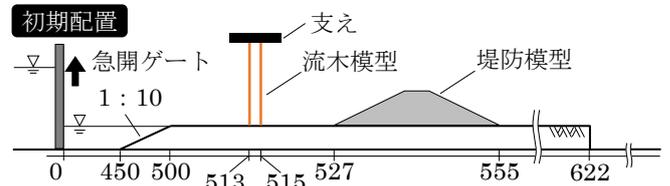


図-1 流木模型の初期配置イメージ図

## (2) 流木模型の設置と実験概要

本実験では、海岸堤防より海側に配置した樹林帯が破断や生育基盤消失によって流木化した樹木が堤防を越流し、堤内地側へ侵入するかを検討する。そのため流木模型は、はじめ上端の支えにより鉛直に配置し、段波到達後に支えを外して流木化させた（図-1）。流木模型の初期配置は、仙台平野の樹林帯（樹木直径：0.2～0.3m、樹木密度：0.20本/m<sup>2</sup>程度）を参考とし、樹木直径：0.4cm、樹木中心軸間距離：2.3cmとして、三角格子状に配置し、流木模型密度：0.22本/cm<sup>2</sup>とした。この形状で、流下方向に2列(2.4cm)の流木模型を堤防模型より12cm海側に配置した。流木模型の樹高 $h_{TR}$ は堤内地側への侵入に大きく影響すると考え、10、20cmの2ケースを実施した。ここで、樹高は堤防高で除して無次元化し、樹高堤防高比 $T' (=h_{TR}/Z_E)$ とした。また、流木化のタイミングについても重要な因子と考え、次の2ケースを実施した。津波により大きな衝撃力を受けると考えられる段波到達直後と、その後の水位上昇と堤防からの反射波の影響が大きく、沖に流される状態になる前に破断する場合として、反射波到達直後を考慮した。

## (3) 流木模型の最終到達位置

流木の最終到達位置は、堤外地側(S: Seaside land)と堤内地側(I: Inland)で分類し、さらに流木模型が堤防模型(E: Embankment)上にとどまっているかによって、領域S、S-E、I、I-Eの4領域に分類した（図-2）。領域S-E、I-Eの境界について、流木模型の重心が堤防模型の裏法肩より沖側（ゲート側）の場合を領域S-E、堤内地側の場

キーワード 流木、レベル2津波、段波、破断、海岸堤防

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

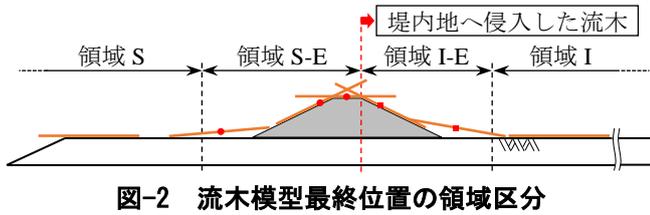


図-2 流木模型最終位置の領域区分

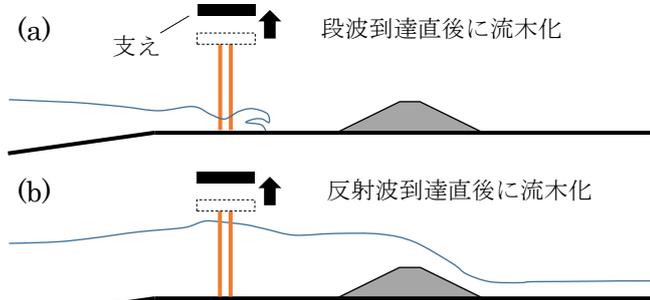


図-3 流木化のタイミング (a): 段波到達直後に流木化, (b): 堤防からの反射波到達直後に流木化

表-1 実験ケースの諸条件

ケース名	樹高堤防高比	流木化のタイミング	波高堤防高比 $H'$
Case F-L	3.2	段波到達直後	0.86, 0.88, 0.93, 1.01, 1.09
Case F-Sm	1.6	段波到達直後	0.69, 0.77, 0.86
Case AR-L	3.2	反射波到達直後	0.86, 0.93, 1.01, 1.09, 1.27
Case AR-Sm	1.6	反射波到達直後	0.69, 0.77, 0.86, 1.01, 1.09

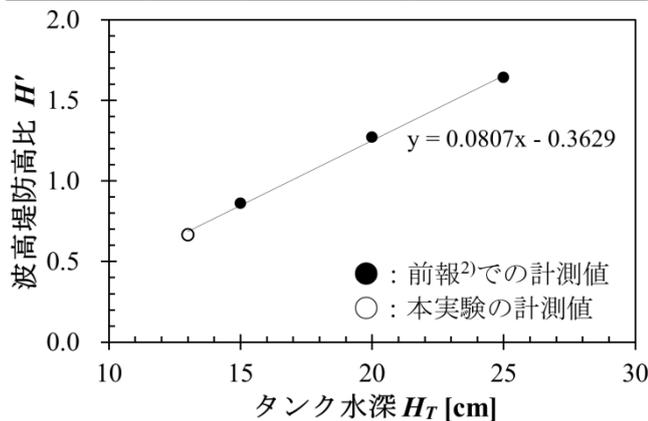


図-4 タンク水深  $H_T$  と波高堤防高比  $H'$  の関係

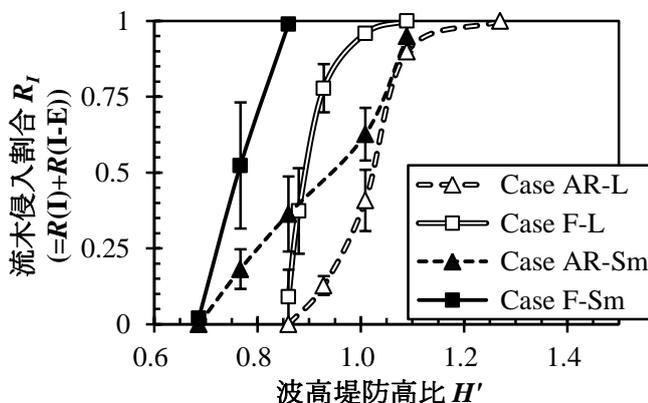


図-5 流木侵入割合  $R_I$

合を領域 I-E に存在する流木模型と判断した。

最終的に領域 S, S-E, I, I-E に存在する流木の本数をそれぞれ計測し、流木模型の総数で除して割合  $R(S)$ ,  $R(S-E)$ ,  $R(I)$ ,  $R(I-E)$  を算出した。領域 I-E, I に存在する流

木模型を堤内地側に侵入した流木として考え、流木侵入割合  $R_I$  を  $R(I)$  と  $R(I-E)$  の和とした。また、流木の堤防上堆積割合  $R_E$  を  $R(S-E)$  と  $R(I-E)$  の和とした。流木模型は基本的に 33 本使用しているが、水路壁面に張り付いてしまった等、計測本数として含めるべきでない判断した流木模型は除いた。

(4) 入力波条件

入力波条件は、ゲート下流側静水深  $H_S$ : 5.2 cm, タンク水深  $H_T$ : 13 ~ 25 cm とした。ここで前報<sup>2)</sup>において、タンク水深  $H_T$  が 15, 20, 25 cm のとき、汀線付近の測定点 (G2) における最大水位  $H_{G2-Max}$  (8 ケースの平均) と固定床高さ 5.2 cm の差を、堤防高  $Z_E$  (= 6.2 cm) で除した波高堤防高比  $H'$  を定義している。

$$H' = \frac{H_{G2-Max} - 5.2}{Z_E} \quad (1)$$

本研究でも同様に波高堤防高比  $H'$  を定義した。ここで、タンク水深  $H_T$  を波高堤防高比  $H'$  に変換するため、 $H_T$ - $H'$  曲線を作成した。ただし、本研究におけるタンク水深  $H_T$  の最小値は 13 cm であり、前報<sup>2)</sup>の範囲に含まれない。そのため、前報<sup>2)</sup>と同様の位置 (測定点 G2) における水深を水路側面から撮影した動画より計測し、その値を含めた回帰式により変換した。

本実験では、すべてのケースにおいて最低 3 回ずつ繰り返し計測を行った。

(5) 実験ケース一覧

実験ケース一覧を表-1 に示す。ケース名規則として、段波到達直後に流木化させるケースは F (First impact), 堤防による反射波到達直後に流木化させるケースは AR (After the reflection) とし、樹高堤防高比  $T'$  が 1.6, 3.2 の場合それぞれ Sm, L (Sm: Small, L: Large) を付した。

3. 実験結果

(1) 流木侵入割合  $R_I$  について

縦軸に流木侵入割合  $R_I$ , 横軸に波高堤防高比  $H'$  をとった  $H'$ - $R_I$  曲線を図-5 に示す。図-5 のプロットは 3 回の実験から平均値を示しており、その標準偏差をバーで示している。 $H'$ - $R_I$  曲線の傾き  $dR_I/dH'$  が大きい場合は標準偏差が大きい、これは  $R_I$  の変化点では流木模型の初期配置や入力波条件のわずかな誤差等が大きく影響するためと考えられる。その他の範囲では標準偏差は非常に小さい値となっているため、結果の優位性は保たれていると考える。

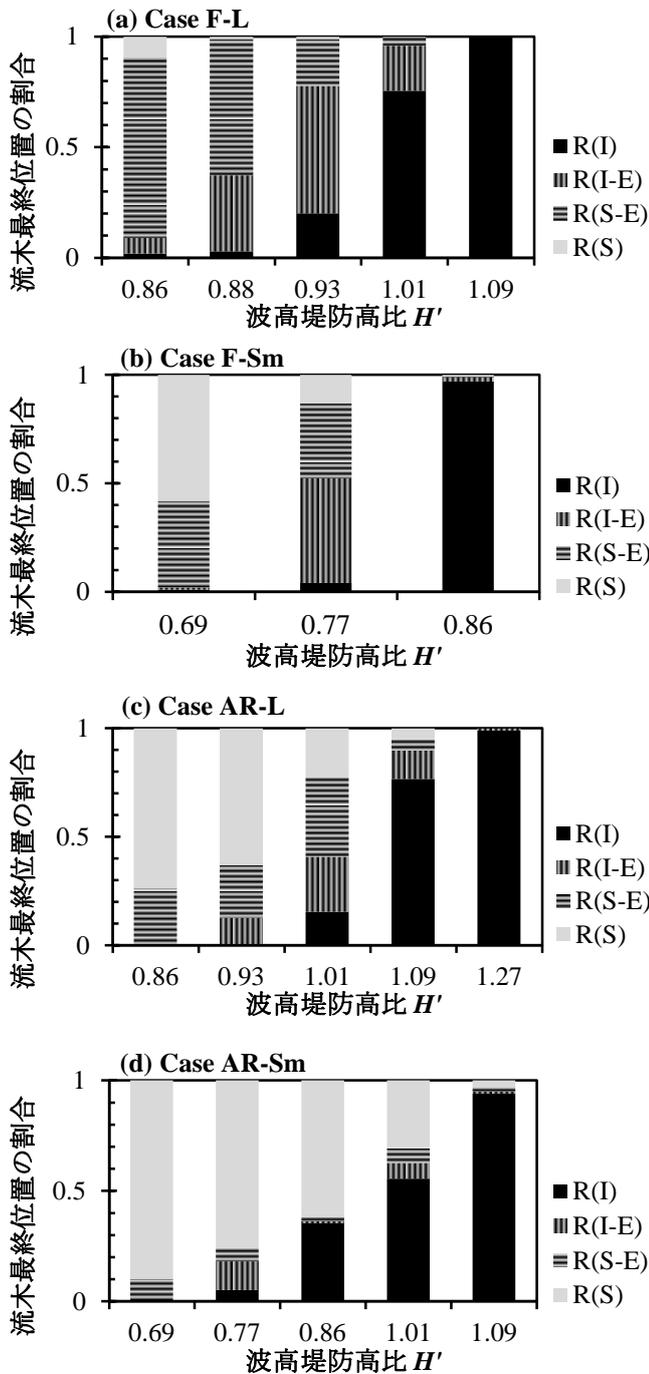


図-6 各ケースにおける流木最終位置の割合

a) 樹高堤防高比  $T'$  の影響

$T'$  の影響を見るため、図-5 の Case F-L ( $T' = 3.2$ ), F-Sm ( $T' = 1.6$ ) を比較する。Case F-L, F-Sm では、それぞれ  $H' = 0.86, 0.69$  のとき  $R_I$  が 0 に近くなっており、それぞれ  $H' = 1.09, 0.86$  のとき  $R_I$  が 1 に近づいている。このことから、 $H'$  が一定のとき、 $T'$  が大きいと  $R_I$  は小さくなることが分かる。これは、Case AR-L, AR-Sm の比較でも同様である。

b) 流木化のタイミングの影響

図-5 の Case F-Sm と AR-Sm 及び Case F-L と AR-L をそれぞれ比較すると、流木化のタイミングが遅れるほ

ど  $R_I$  は小さくなることが分かる。ただし、 $R_I$  が 0 に近くなる  $H'$  の値は同程度になっている。

(2) 流木最終位置の分布について

流木の移動機構について詳細に考察するため、各波高堤防高比  $H'$  における  $R(S)$ ,  $R(S-E)$ ,  $R(I)$ ,  $R(I-E)$  を図-6 にケースごとに示した。(a):Case F-L, (b):Case F-Sm, (c):Case AR-L, (d):Case AR-Sm)。

図-6(a)Case F-L に関して、 $H' = 0.93$  のとき  $R$  は 0.78 と高いが、そのうち  $R(I-E)$  が 0.58 と高く、領域 I まで侵入した割合  $R(I)$  は 0.20 と低い。堤防による流木の捕捉は堤内地の被害を減らすためには重要である。

a) 樹高堤防高比  $T'$  の影響

Case F-L, F-Sm について図-6(a), (b) より比較する。Case F-L は  $R_I = 0.37 (H' = 0.88)$  のとき堤防上に堆積する流木の割合  $R_E$  は 0.96 である。一方で Case F-Sm は、 $R_I = 0.52 (H' = 0.77)$  と流木侵入率  $R_I$  は Case F-L より高いが  $R_E$  は 0.83 と低い。以上より、 $R_I$  が同程度の場合において、 $T'$  が大きい方が堤防上に堆積されやすいと言える。

b) 流木化のタイミングの影響

反射波到達直後に流木化した場合に  $R_E$  が低く、沖側へ流される割合  $R(S)$  が大きくなっていることが図-6(a) と(c) または(b) と(d) の比較から見て取れる。

(3)  $H'$ - $R_I$  曲線の形状

a) 樹高堤防高比  $T'$  の影響

図-5 を見ると、 $T'$  が大きい Case F-L, AR-L では  $H'$ - $R_I$  曲線は S 字曲線であり、 $T'$  が小さい Case AR-Sm では、直線的な関係になっている。Case F-Sm は、 $H'$  に関して 3 ケースのみの計測であるため、 $H'$ - $R_I$  曲線の形状は判断しないこととした。

b) 流木化のタイミングの影響

図-5 より、流木化のタイミングが早い Case F-L, F-Sm の方が  $H'$ - $R_I$  曲線の傾きが大きいことが分かる。Case F-Sm, AR-Sm の  $dR_I/dH'$  はそれぞれ 5.7, 2.4 となっている。ここで、 $dR_I/dH'$  は  $R$  が 0, 1 に近くなる 2 点間の傾きから算出した。

4. 考察

(1) 樹高堤防高比  $T'$  が流木侵入割合  $R_I$  と堤防上堆積割合  $R_E$  に与える影響

$T'$  が大きい方が流木侵入割合  $R_I$  は低く、かつ流木の堤防上堆積割合  $R_E$  が高くなったが、これは樹高と堤防裏法面の長さの関係が影響したと考える。樹高堤防高

比が大きいケース( $T'=3.2$ )の場合、堤防法面の長さよりも樹高が大きい場合、天端上の越流水深がある程度大きい越流中期でも流木が領域 I-E にとどまりやすく、この流木がその後沖側からくる流木をさらに捕捉するため、 $R_E$ は高くなったと考える。

樹高が大きいほど堤内地への侵入は抑えられ、堤防を越えた場合でも堤防上にとどまりやすいことが分かった。ただし、堤防より海側に樹林帯を配置する場合、樹木が十分に育たないことも考えられる。その場合でも堤内地への侵入を抑えるには、流木化を防ぐような樹形管理（破断されにくくするため枝下高を高くしすぎないこと等）が必要であると考えられる。

### (2) 流木化のタイミングが $R_I$ と $R_E$ に与える影響

流木化のタイミングが遅い方が流木侵入割合  $R_I$  は小さく、流木の堤防上堆積割合  $R_E$  も小さいことが示された。反射波到達後に流木化する方が  $R_I, R_E$  がともに小さくなるのは、反射波により沖側へと運ばれる流木の割合  $R(S)$  が増加したためと考えられる。 $R_E$  が小さくなるのは、次の理由も考えられる。流木化のタイミングが遅いため、領域 I-E に流木がとどまるのは越流後期であり、その後沖側から来る流木を捕捉する効果は小さくなるためである。

### (3) $H'$ - $R_I$ 曲線の形状

領域 S-E にとどまる流木は、 $H'$  のわずかな上昇で領域 I-E, I へ移動する。そのため、ある  $H'$  において  $R(S-E)$  が大きいと、 $H'$  のわずかな上昇で  $R_I$  が大きく増加すると思われる。Case F-L では、 $H' = 0.86, 0.88$  で  $R(S-E)$  が  $0.82, 0.62$  と大きい場合、 $H'$  がそれより大きくなる範囲 ( $H' = 0.86 \sim 0.93$ ) で  $dR_I/dH' = 9.9$  と大きく、その他の範囲では  $dR_I/dH'$  が小さくなり S 字曲線となったと考える。これは Case AR-L においても同様である。一方で、Case AR-Sm では、平均的に  $R(I-E)$  が小さいため、 $dR_I/dH'$  はほぼ一定となり、直線的な変化になったと考える。

反射波到達直後に流木化した場合、内陸方向の流速だけでなく反射による沖方向の流速が存在するため、領域 S-E における流木の速度は遅くなる。そのため、 $H'$  の変化に対して領域 S-E における流木の速度の変化は小さく、流木が堤防を越える割合もほとんど変化しないことから、 $dR_I/dH'$  が小さくなったと考える。これに加えて、反射波到達後に流木化する場合は上述したように  $R(S-E)$  が小さいため、 $dR_I/dH'$  は小さくなると考えられる。

$T'$  を一定としたとき、流木化のタイミングによらず、 $R_I$  が 0 に近くなる  $H'$  が同程度であるのは、ある流木直径に対して流木が堤防を越流するのに可能な越流水深の限界値が決まっているためと考えられる。

反射波到達後に流木化する場合は、 $dR_I/dH'$  は小さく、かつ  $R_I$  が 0 に近くなる  $H'$  は流木化のタイミングによらず同程度であるため、より大きな規模の津波に対して  $R_I$  を小さくする効果が大きいといえる。

## 5. 結論

堤内地の樹林帯が津波により流木化した後の挙動に関して、本実験で得られた結論を以下に示す。

- (1)  $T'$  (樹高/堤防高) が大きい場合、堤内地へ侵入する流木の割合  $R_I$  は低い。さらに、堤内地へ侵入した流木が堤防に捕捉される割合  $R_E$  も高い。
- (2) 流木化のタイミングが遅い場合、沖側へ運ばれる割合が増加するため、 $R_I$  は低く抑えられ流木の堤防上堆積割合  $R_E$  も低くなる。さらに、 $H'$  (汀線付近の最大波高/堤防高) の増加量に対する流木侵入割合  $R_I$  の増加量は小さく、かつ  $R_I$  が 0 となる  $H'$  は流木化のタイミングによらず同程度である。そのため、大きい規模の津波であるほど流木化せずに耐えた時間が  $R_I$  の上昇を抑える効果は高いといえる。

海側の樹木は潮風の影響などもあり大きくなるには時間がかかる場合もあるが、規模の大きな津波にすぐ破壊されないよう、枝下高が高くなりすぎないよう、また根鉢を発達させるような樹形管理が望まれる。実際の樹形管理と関連づけるのは今後の課題である。

**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) 国土交通省: 平成 25 年度国土交通白書, 第 II 部, 第 1 章, 第 7 節 (<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/pdf/np201000.pdf>), 2014.
- 2) 五十嵐善哉, 田中規夫: 堤防前面の樹林帯の厚みと樹木倒伏が堤防越流量に与える影響の実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, I\_319-I\_324, 2016.