津波漂流物の捕捉機能を有する植栽の設計に関する研究

RESEARCH ON THE DESIGN OF PLANTING
WITH THE CAPTURE FUNCTION OF FLOATING OBJECTS DURING TSUNAMI

林晃大¹・今井健太郎²・今村文彦³

Akihiro HAYASHI, Kentaro IMAI and Fumihiko IMAMURA

¹ 学生会員 東北大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-1106)

² 正会員 博(工) 東北大学助教 災害科学国際研究所 (同上)

³ 正会員 工博 東北大学教授 災害科学国際研究所 (同上)

Trapping mechanism of floating objects during tsunami due to aligned trees was investigated through field surveys and hydraulic experiments. From the hydraulic experiment, the physical factors related to roadside trees and explaining the capture of floating objects were obtained. In addition, we show the maximum momentum limit at which trees fall when floating objects were trapped. Using the floating objects capture evaluation method of the trees that considered falling of trees, a verification case was performed knowing the specifications of the trees and floating objects in Tagajo city in case of the 2011 Tohoku earthquake and tsunami. We proved that the trees in Tagajo city did not fall even if it trapped floating objects during tsunami, generally agreeing on the quantity of the trapping ratio.

Key Words: floating objects, trees, hydraulic experiments, momentum, trapping ratio

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による津波は、東北地方の沿岸地域に壊滅的な被害をもたらした。林野庁¹⁾の発表によると、今回の津波による青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉の 6 県の海岸林の浸水被害は約 3660 ha であり、空中写真等を用いて流失・水没・倒伏状況を判読した結果、被害区分 75 % 以上が約 3 割、25 ~ 75 % が約 2 割強と、かつてない甚大な被害状況となった。

既往研究によると、首藤²⁾は過去の津波事例から防潮林による津波被害軽減効果についての評価を試み、防潮林の津波流勢の低減や船舶などの津波漂流物捕捉、津波にさらわれた人がさがりつく対象物としての緊急避難施設としての機能を事例に基づいて示した。

樹木群による津波減勢効果³⁾⁴⁾、樹木の倒伏耐力に関する検討⁵⁾⁶⁾⁷⁾についても、既往の研究成果により、実用に耐えうる評価が可能となりつつある。一方で、津波漂流物の捕捉機能については、いずれの研究においても、これまでの事例に基づいた定性的議論²⁾⁸⁾にとどまっている。

今井ら⁹⁾は街路樹などの並木による漂流物捕捉機能に関して、現地調査や水理実験を通じて詳細な検討を行い、並木の漂流物捕捉機能について、並木と漂流物の関係を定量的に示した。しかしながら、漂流物捕捉に伴う倒伏などの樹木の物理的限界については検討されていない。並木による漂流物捕捉機能を考慮した防

災施設を設計する上では、倒伏などの限界を議論することは不可欠であると考えられる。

本研究では、水理実験から得られた並木による津波漂流物捕捉効果の定量的な知見に基づいて、漂流物捕捉時の並木の倒伏限界について検討するとともに事例検証を行い、防災施設としての並木の適用性を明らかにすることを目的とする。

2. 並木の津波漂流物捕捉機能

(1) 今井ら (2012) の検討

図-1 は宮城県多賀城市において確認された並木による漂流物捕捉事例である。敷地周りの並木により資材及び車の敷地外への流失を阻止している様子がわかる。今井ら⁹⁾は現地調査と水理実験の結果から、並木の津波漂流物捕捉機能について定量的な評価手法を提案した。評価に用いた変数は、水理実験の結果から得られた並木の津波漂流物捕捉機能に関わる物理因子である津波漂流物の代表長さ(最大長)と並木間隔の比、津波外力、津波漂流物のアスペクト比と並木列数である。並木列数をより一般的な変数として表現するために植生厚み $d_C \cdot n^{(2)}$ を用い (d_C は幹直径 (m), n は単位林帯幅あたりの立木本数), 津波外力としては津波浸水深 D と d_C の比である D/d_C , 津波漂流物の代表長さ(最大長)と並木間隔の比 L_m/l_t (L_m : 漂流物の代表長さ, l_t : 並木間隔), 津波漂流物のアスペクト比 L/W とした。漂流物捕捉割合 $R_C = N_C/N_A$ (N_C : 並木により捕捉

図-1 津波漂流物捕捉状況（宮城県多賀城市の事例）

図-2 実験水路概要（レーザー設置後）

された漂流物数， N_A ：全漂流物数）を定義し， R_C を実験による評価の対象とした．以下にその関数型を示す．

$$R_{C1} = \frac{1}{1 + e^{-1}} \quad (1)$$

$$1 = -0.31 (d_c n)^{-0.34} (L_m/l_t)^{-0.93} (D/d_c)^{0.70} (L/W)^{0.40} + 5.0 \pm \sigma \quad (2)$$

ここで， $\alpha = 0.93$ ，決定係数 $R^2 = 0.8$ ，有意水準 $p < 0.001$ である．また，本式の適用範囲としては $d_c \cdot n < 0.3$ ， $D/d_c < 8$ ， $0.3 < L_m/l_t < 2.25$ ， $L/W < 3$ である．式(1)，(2)により想定される並木の諸元と漂流物の種類を選択することで，並木の津波漂流物捕捉機能を容易に評価することが可能である．

(2) 漂流物群条件についての水理実験

a) 漂流物の群体規模の変化に伴う並木の津波漂流物捕捉割合の変化

今井ら⁹⁾の検討は，屋敷林に囲まれた資材場における漂流物捕捉など，限定的な条件下での検討であったため，流下漂流物の規模については検討していない．しかしながら，実際の流下漂流物規模は漂流物の大きさや数などの条件の問題による不確定要素が大きく，定量把握は難しい．そこで，漂流物の群体規模を変化させた場合の並木による津波漂流物捕捉機能を検討するための水理実験を実施した．

図-2 に実験装置の概略を示す．実験装置は全長 15 m の断面一次元水槽を用いた．表-1 に実験条件を示す．漂

表-1 実験条件

貯留水深 (H_U)	10, 12, 14 cm
漂流物種類	立方体 (1.5 cm × 1.5 cm × 1.5 cm) 直方体 (4.5 cm × 1.5 cm × 1.5 cm)
漂流物個数	立方体: 12, 21, 33, 45, 54, 66, 78, 87, 99 直方体: 4, 7, 11, 15, 18, 22, 26, 29, 33
漂流物初期位置	1 m
並木模型直径	0.4 cm
並木模型間隔	3 cm
並木模型列数	1

図-3 S_F と津波漂流物捕捉割合の関係

流物模型は今井ら⁹⁾の検討を参考に工業製品，車を想定している．並木模型は列数を増やすと漂流物捕捉能力が向上する⁹⁾が，本検討では安全側の評価となるよう 1 列のみの検討とした．津波氾濫流はゲート急開流れで模擬した．氾濫流の相似則はフルード則を用い，縮尺は 1/100 とした．漂流物や樹木模型は縮尺のみ考慮しており，樹木の弾性相似則¹⁰⁾は考慮していない．樹木模型は直径 4 mm のステンレス円柱を用い，並木の配置条件は現地調査結果や実際の街路樹を参考にした．実際には樹冠部の影響による漂流物捕捉効果も考えられるが，より安全側の評価となるように，樹木模型としては幹部のみとした．貯留水深 $H_U = 10, 12, 14$ cm における，漂流物が存在しない場合の平均最大水位はそれぞれ 1.5, 1.8, 2.2 cm である．群体規模 S_F は漂流物数立方体 99 個，直方体 33 個の場合を基準とした比を示す．各実験条件に対して 10 回反復して実験を行い，再現性の確認を行った．

計測項目は並木模型前面位置と背後部で超音波変位計（キーエンス社製 UD-500，UD-020）により段波水

図-4 漂流物捕捉時の様子

図-5 漂流物群密度の捉え方

位の経時変化を測定した。漂流物捕捉割合 $R_C^{(9)}$ を定義し、実験による評価の対象とした。ただし、水槽側壁の影響で捕捉された漂流物については評価から除外した。

図-3 に津波漂流物群の群体規模の変化に伴う漂流物捕捉割合の変化を示す。図から津波漂流物群の量が増えるに従い、並木に捕捉される津波漂流物の割合が増加する傾向にあることがわかる。津波漂流物群の規模が大きい場合は、津波漂流物群が流下時に群体を形成することで、並木に捕捉される際にアーチング¹¹⁾を形成する(図-4)。並木に捕捉された漂流物群によるアーチングの形成により、漂流物群を捕捉した並木列からの抗力と津波外力がつりあい、捕捉量が増加する傾向にある。それに対して、津波漂流物群の規模が小さい場合には、津波漂流物の振る舞いは単体のものに近くなり、アーチングの形成が難しくなるため、捕捉割合は低い。また、津波外力に着目すると、漂流物の L/W に関わらず、津波外力が強くなるほど捕捉割合の値は低下し、たとえ漂流物群が並木に捕捉されて安定している状態(図-4)でも、流勢が強くなるとアーチングを形成することができずに押し出される。

b) 流下漂流物の群密度・移動速度と漂流物捕捉割合の関連性

流下漂流物群の挙動を定量的に把握するべく、新たに漂流物群密度 $D_{fg} = s/(B \cdot L)$ (s : 漂流物群投影面積, B : 水路幅, L : 漂流物群の流れ方向の拡散長さ) を定義した(図-5)。 D_{fg} は実際は単位面積あたりの漂流物群密度を示し、値が小さいほど流下漂流物群が散けていることを意味する。漂流物群の流れ方向の拡散長さ L は水路側部にタッチセンサー(Panasonic 社製 EX-L200)を設置して(図-2)、漂流物群の通過時間及

図-6 D_{fg} と津波漂流物捕捉割合の関係

び移動速度から評価した。

図-6 に D_{fg} と津波漂流物捕捉割合の関係を示す。実験値 R_{C-exp} について、 D_{fg} の値が 0.05 毎の区間でそれぞれの平均値を示した。いずれの場合もばらつきはあるものの、おおそ D_{fg} が大きくなると漂流物捕捉割合も大きくなる傾向があり、特に $L/W = 1$ の $H_U = 10, 12$ cm の場合について確認できる。漂流物が群体を形成した場合、その大きさが並木間隔よりも大きくなり、並木に捕捉されやすくなることがいえる。 $L/W = 3$ においては、 D_{fg} が 0.1 ~ 0.2 と比較的小さい値であっても、漂流物捕捉割合が大きな値を示している例も確認できるが、本実験条件においては $L/W = 3$ のときは漂流物単体の大きさが並木の間隔よりも大きく、比較的並木に捕捉されやすい。 $L/W = 1$ の $H_U = 14$ cm の場合は、 D_{fg} の値に関わらず漂流物捕捉割合は小さく、津波外力の影響が考えられる。

図-7 にフルード数 F_r と津波漂流物捕捉割合の関係を示す。氾濫流速は、漂流物群の移動速度と同程度と仮定した。全体的な傾向として、 F_r の増加にともなって漂流物捕捉割合は減少していることが確認できる。流速が大きい場合、図-4 の状態のように漂流物群が並木に捕捉された場合でも、流勢の強さによって押し出されることが実験でも確認されている。また、 $L/W = 3$ においては、 F_r が大きい値であっても漂流物捕捉割合が大きな値を示している例も確認できる。本実験条件においては $L/W = 3$ のときは漂流物単体の大きさが並木の間隔よりも大きいため、比較的並木に捕捉されやすい。

図-7 F_r と津波漂流物捕捉割合の関係

表-2 各パラメータの偏相関係数

Multi.Corr.Coeff	R_C	D/d_C	L/W	D_{fg}	F_r
R_C	1.00				
D/d_C	0.04	1.00			
L/W	0.67	-0.02	1.00		
D_{fg}	0.23	0.59	-0.23	1.00	
F_r	-0.44	0.55	0.34	-0.38	1.00

表-3 各評価式の c-AIC および決定係数 R^2

Model	使用パラメータ	R^2	c-AIC
$_{21}$	$L/W, D/d_C, D_{fg}, F_r$	0.79	-48.8
$_{22}$	$L/W, D/d_C, F_r$	0.66	-66.8
$_{23}$	$L/W, D/d_C, D_{fg}$	0.80	-19.8
$_{24}$	$L/W, D_{fg}, F_r$	0.77	-66.9

以上から、流下漂流物群条件を考慮した漂流物捕捉機能に関わりうる影響因子としては、 D_{fg} 、津波外力、 L/W 、 F_r であることがわかる。

c) 漂流物群条件を考慮した並木の漂流物捕捉機能に関する定量評価手法

水理実験により推定された各無次元パラメータを用いて評価手法を構築していく。各パラメータの偏相関係数から（表-2）、 R_{C2} に有意な相関がみられるパラメータとしては、 L/W と D_{fg} であること、 F_r は R_{C2} と逆相関にあることがわかる。また、 D/d_C と D_{fg} 、 D/d_C と F_r にも正の相関関係にあることがわかる。以上から、評価式に用いる説明変数としてのパラメータは、 L/W と D/d_C 、 D_{fg} 、 F_r の3つのうちから2つ以上選択する

図-8 実験値と評価式 (3) の整合性

ことが適切と考えられる。水理実験の結果と統計学的検討から、 L/W 、 D/d_C 、 D_{fg} 、 F_r の無次元パラメータを、流下漂流物群条件を考慮した漂流物捕捉に関わる説明変数として、標準シグモイド関数に基づいた評価式を構築した。式 (3) にその関数型を示す。

$$R_{C2} = \frac{1}{1 + e^{-\Phi_2}} \quad (3)$$

ここで、 R_{C2} は流下漂流物群条件を考慮した漂流物捕捉割合である。また、 $_{21}=f(L/W, D/d_C, D_{fg}, F_r)$ 、 $_{22}=f(L/W, D/d_C, F_r)$ 、 $_{23}=f(L/W, D/d_C, D_{fg})$ 、 $_{24}=f(L/W, D_{fg}, F_r)$ である。はベキ関数型をとるとした。各変数における係数は実験値に基づいて最小二乗法により決定した。加えて、c-AIC⁽¹²⁾ が最小かつ決定係数 R^2 が最大の値となるような $_{24}$ を選んだ。表-3 に $_{21} \sim _{24}$ の R^2 、c-AIC の値を示す。本実験範囲における最適なモデルは $_{24}$ であり、式 (4) に示す。

$$\Phi_2 = -4.2(L/W)^{-0.37} D_{fg}^{-0.11} F_r^{0.74} + 5.0 \pm \sigma \quad (4)$$

ここで、 $\sigma=1.03$ 、 $R^2=0.77$ 、有意水準 $p < 0.001$ である。本式の適用範囲は $L/W < 3$ 、 $0 < D_{fg} \leq 0.5$ 、 $0.8 < F_r < 2.0$ である。図-8 に実験値と評価式による計算値の整合性を示す。式 (3)、(4) より多少のばらつきがあるものの本検討の範囲内において並木の漂流物捕捉割合と流下漂流物群条件の関係を説明できていることがわかる。並木の津波漂流物捕捉機能評価において、式 (1)、(2) による R_{C1} は、並木間隔や漂流物諸元に依存した幾何学的条件によるものである。一方、式 (3)、(4) による R_{C2} は、流下漂流物の密度や、流勢 (F_r) を考慮したものであり、本研究では、 R_{C1} 、 R_{C2} は独立の関係にあると仮定する。以上から、漂流物密度や流勢を考慮した漂流物捕捉機能評価は式 (5) で評価する。

$$R_C = R_{C1} \cdot R_{C2} \quad (5)$$

図-9 樹木にかかる倒伏モーメント ($D > h_f$)

図-10 樹木にかかる倒伏モーメント ($D \leq h_f$)

3. 漂流物捕捉に伴う樹木の倒伏限界

(1) 既存の樹木強度の評価

以上の検討により、並木条件、漂流物条件と津波外力から並木の津波漂流物捕捉機能について定量的な評価を与えることが可能となった。しかしながら、漂流物捕捉にともなった並木の倒伏は考慮していない。そこで、津波漂流物捕捉時の並木にかかる力について検討を行い、既往の樹木強度についての知見を用いて、その限界について検討を行った。

並木を沿岸部の津波減災に活用する場合、津波に対する樹木の倒伏耐力を検討する必要がある。河道内樹木の倒伏限界については、既往の研究¹³⁾¹⁴⁾により詳細が調べられており、黒松に代表される沿岸部の樹木の倒伏耐力については、今井・鈴木⁵⁾が河道内樹木における倒伏モーメント評価式に対する沿岸部の樹木への適合性を確認している。以上の研究成果から樹木の倒伏モーメントを樹木の胸高直径で定義することが可能であり、樹木の倒伏モーメントを簡便かつ定量的に判定可能である。しかしながら、樹木の群生環境が限定的であることや評価値にばらつきがあることが課題とされている。

本稿では、海岸林の林相調査及び黒松の引き倒し試験結果を用いた今井ら¹⁵⁾の倒伏評価モーメント式を用いる。以下に式を示す。

$$M_C = \beta \sigma_b W \quad (6)$$

β は群生環境係数であり、樹木の胸高直径、樹木占有率、根上部からの被砂層厚に依存する係数、 $\sigma_b = 28.3 \text{ N/mm}^2$ 、 W は幹直径 d_C (m) を用いた断面係数 ($= \pi d_C^3 / 32$) である。 β について、本稿では試験結果の平均値である $\beta = 1.9$ と最小値である $\beta = 1.2$ を用いて検討を行った。

(2) 漂流物捕捉時の樹木にかかる倒伏モーメントの提案

津波漂流物を捕捉したときの樹木に作用する力を図-9, 10 のように考える。対象とする樹種は黒松で、並木に捕捉された漂流物と漂流物によって排される流体から受ける力を樹木 1 本あたりについて想定している。本研究では並木に漂流物が水深方向に重なって捕捉さ

れることは考慮せず、漂流物の衝突力についても、本稿では第 2～3 線の津波防災施設としての並木を想定した検証であるために考慮せず、静的な荷重のみ検討した。捕捉された漂流物群から並木全体に作用する力 $F_{Flotsam}$ を以下に示す。

$$F_{Flotsam} = \rho U^2 \cdot R_C A_{all} \quad (D > h_f) \quad (7)$$

$$F_{Flotsam} = \rho U^2 \cdot R_C A_{all} D / h_f \quad (D \leq h_f) \quad (8)$$

ρ は水の密度、 U は代表流速、 A_{all} は漂流物群の流向方向投影面積、 h_f は漂流物高さである。漂流物の捕捉割合は A_{all} に反映すると仮定した。漂流物の投影面積について、設定した並木列に捕捉される漂流物の最大投影面積 A_{max} を予め設定し、 $A_{max} \leq R_C A_{all}$ の場合、 $R_C A_{all} = A_{max}$ とすることで、漂流物に捕捉される漂流物の量により投影面積が無限に増大しないようにする。

樹幹部に作用する流体力 F_{Trunk} を以下に示す。

$$F_{Trunk} = \frac{1}{2} \rho C_D U^2 \cdot d_C (D - h_f) \quad (9)$$

漂流物を捕捉したときの樹木の根部まわりのモーメントは式 (10), (11) で表現される。

$$M_{C1} = \frac{1}{2} (D - h_f) F_{Trunk} + (D - \frac{h_f}{2}) F'_{Flotsam} \quad (D > h_f) \quad (10)$$

$$M_{C2} = \frac{1}{2} D F'_{Flotsam} \quad (D \leq h_f) \quad (11)$$

ここで $F'_{Flotsam}$ は樹木 1 本あたりにかかる $F_{Flotsam}$ である。

(3) 事例検証

本稿では、東北地方太平洋沖地震津波にて確認された、宮城県多賀城市栄 2 丁目における並木による津波漂流物捕捉事例 (図-1) について、本稿で提案した評価手法をもとに検証を行った。

図-11 は宮城県多賀城市栄 2 丁目における並木による津波漂流物捕捉事例にて確認された諸条件 (表-4) をもとに、浸水深と漂流物捕捉を考慮した倒伏モーメントの変化及び並木の津波漂流物捕捉割合の変化を示す。図中の赤鎖線・黒鎖線は今井ら¹⁵⁾による黒松の倒伏限界モーメントの評価値を示し、赤鎖線を上回ると樹木の倒伏、下回れば樹木の残存を表す。図から F_r による

表-4 検証事例諸条件

位置	N 38.288° E 141.021°
漂流物	乗用車 (5.0 m × 2.0 m × 1.5 m) 幅 50 m に 20 台
流速	$F_r=1.0, 1.2, 1.4$ の場合を検討
並木間隔	3.6 m 間隔 1 列
並木直径	0.37 m
R_C 条件	$D_{fg}=0.5, F_r=1.2$

図-11 並木の倒伏モーメントの検証結果（多賀城市）

ものの、漂流物の捕捉を考慮に入れた場合でも津波浸水深が 1.8～2.3 m までなら、樹木は倒伏せず、漂流物も多く捕捉を見込めることがわかる。そして、当該地域における津波浸水深は現地調査結果及び国土地理院の地形データから 1.7 m であり、当該地域の並木に倒伏は確認されておらず、捕捉割合の値についても概ね現地の状況と合致していることが確認できる。

4. おわりに

本稿で得られた結果を以下に示す。

1. 現地調査と水理実験から、並木の漂流物捕捉に関わる物理因子を抽出し、並木の津波漂流物捕捉について並木・漂流物群各諸元からそれらを定量的に評価可能とする評価式を提案した。
2. 並木の津波漂流物捕捉機能に関する評価式を用いて、津波漂流物捕捉時に樹木にかかる倒伏モーメントの提案を行った。
3. 津波漂流物捕捉時の樹木にかかる倒伏モーメントの評価手法を用いて、東北地方太平洋沖地震津波における事例のもとで、津波浸水深と並木にかかる倒伏モーメント、漂流物捕捉割合の関係を示し、現地の状況について検証を行った。

謝辞：東北大学工学部元助手の山路弘人氏、技術一般職員の会田俊介氏には水理実験を遂行するにあたり、実験水路の整備及び計測機器の調整・設置をしていただくなど多大な助力を頂きました。また、本学修士学生の橋本康平氏、林里美氏、久松明史氏、堀内滋人氏、北海道ガス株式会社の堀川亮祐氏には水理実験を実施す

る際に多大な助力を頂きました。図の作成には国土地理院発行の「数値地図 25000」を使用しました。本研究は科学研究補助金（研究代表者：今井健太郎、若手研究(B)：課題番号 23710200）、平成 25-32 年度文部科学省「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」（研究代表者：独立行政法人海洋研究開発機構 プロジェクトリーダー 金田義行）の一環として行われました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 林野庁 (オンライン): <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/dai5kai-siryous.pdf>, 参照 5-21-2012
- 2) 首藤伸夫: 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, 1985.
- 3) 原田賢治, 今村文彦: 防潮林による津波減衰効果の評価と減災のための利用の可能性, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.341-345, 2003.
- 4) 今井健太郎, 松富英夫: 沿岸植生域を氾濫する津波の水理, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.3, pp.258-269, 2006.
- 5) 今井健太郎, 鈴木明菜: 沿岸樹木のパイプモデルを用いた表面積, 体積評価とその倒伏耐力, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.306-310, 2005.
- 6) 今井健太郎, 松富英夫: 樹冠部の変形を考慮した樹木の抵抗則とそれを用いた沿岸林域の氾濫計算, 土木学会論文集 B, Vol.64, No.3, pp.214-225, 2008.
- 7) 柳澤英明, 越村俊一, 宮城豊彦, 今村文彦: 2004 年インド洋大津波におけるマングローブ林のフラジリティ関数, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.286-290, 2008.
- 8) 坂本知己, 新山馨, 中村克典, 小谷英治, 平井敬三, 齋藤武史, 木村公樹, 今純一: 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, 海岸林学会誌, 11(2), pp.65-71, 2012.
- 9) 今井健太郎, 林晃大, 今村文彦: 並木の津波漂流物捕捉機能に関する基礎的検討, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, p.L401-L405, 2012.
- 10) 松富英夫, 大沼康太郎, 今井健太郎: 植生域氾濫流の基礎式と植生樹幹部の相似則, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.301-305, 2004.
- 11) 木岡信治, 森昌也, 山本泰司, 遠藤強, 竹内貴弘: 流水群とアイスブームの相互作用に関する水理模型実験とその数値計算に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.1053-1058, 2009.
- 12) Sugiura, N.: Further analysts of the data by akaike's information criterion and the finite corrections, Communications in Statistics - Theory and Methods, 7(1), pp. 13-26, 1978.
- 13) 渡邊康玄, 市川嘉輝, 井出康郎: 洪水時における河道内樹木の倒伏限界, 水工学論文集, 第 40 巻, pp.169-174, 1996.
- 14) リバーフロント整備センター 編集: 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp.156-160, 1999.
- 15) 今井健太郎, 原田賢治, 南幸弘, 川口誠史, 二宮栄一: 海岸樹木の津波耐力評価手法の高度化, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, p.L361-L365, 2013.
- 16) 国土地理院 (オンライン): 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による被災地の空中写真, <http://saigai.gsi.go.jp/h23taiheiyo-hr/index.html>, 参照 5-12-2012

(2013.9.30 受付)