

海岸樹木の津波に対する耐力限界 に関する実物試験

原田 賢治¹・峯田 純平²・瀬尾 直樹³・金原 剛⁴

¹ 正会員 静岡大学准教授 防災総合センター (〒422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷 836)
E-mail:harada.kenji@shizuoka.ac.jp

² 非会員 静岡大学 理学部地球科学科 (〒422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷 836)
E-mail:r0414037@shizuoka.ac.jp

³ 正会員 元ふじのくに防災フェロー養成講座 (〒422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷 836)
E-mail:naoki_seo19640216@yahoo.co.jp

⁴ 正会員 元ふじのくに防災フェロー養成講座 (〒422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷 836)
E-mail:kinpara1016@gmail.com

本研究では、日本の海岸林を対象とし、津波耐力限界の定量的な評価手法を検討する事を目的とした。津波による流体力が海岸林に作用する事により生じるモーメントに着目し力学的な耐力限界の特性について、焼津市田尻の海岸に自制していたクロマツを対象に現地引き倒し試験をおこない、樹木の根と地盤による倒伏モーメントに関する耐力限界を引張り荷重と変位を同時計測することにより算出した。さらに、幹折れや折損のような幹断面が破壊される力学的な条件として、幹断面の曲げモーメントについてクロマツ生木を用いた曲げ強度材質試験による計測結果を分析することで曲げモーメントによる樹木幹材の耐力限界の評価手法を検討した。

Key Words: coastal forest, tsunami force, tree-pulling test, bending test, overturning moment, MOR

1. はじめに

津波来襲時において、海岸林が津波の勢いを弱め、漂流物を捕捉することで被害の拡大を軽減する効果があることが過去の災害事例調査より知られている¹⁾。東日本大震災においても、東北地方沿岸の海岸林は大きな被害を受けるとともに、海岸林により津波の被害が軽減されたと見られる事例や流木が被害を拡大させたとする報告がされている。一方で、東北の復興や南海トラフ巨大地震への津波津波防災対策事業の海岸整備において、緑の防潮堤と呼ばれる様な海岸保全施設に海岸林を活用した対策整備が検討されている。津波に対して、海岸林がどのような条件で被害を受け、流失に至るのかは力学的な現象として現地特性を踏まえて評価されるべきであるが、日本の海岸林における特性は十分に明らかにされていない。巨大な津波が来襲した際には、海岸林が破壊され、流出し漂流物となり被害が拡大する可能性がある。津波対策における海岸林の持つ津波減勢機能の発揮に向けて、その耐力限界を明らかにすることは重要な課題である。

津波による海岸林の代表的な被害形態として、原田・松富(2012)²⁾、Harada(2013)³⁾では、①折損(幹折れ)、②傾倒、③根返り、④抜根、⑤侵食流出に分類することができるとし、代表的な被害形態として折損(幹折れ)と根返りについて、津波作用流体力と地盤反力モーメント、幹の曲げモーメントについて検討している。また、鳥田ら(2014)⁴⁾も同様に力学的な海岸林の被害メカニズムに基づいて、クロマツを対象に根返り抵抗モーメント(根返り)と幹の曲げ強さ(折損、幹折れ)について検討している。本検討においても、クロマツを対象に津波による海岸林の代表的被害形態として、折損(幹折れ)と根返りについて検討する。

本研究では、津波による流体力が海岸林に作用する事により生じるモーメントに着目し力学的な耐力限界の特性について、現地引き倒し試験およびクロマツ生木を用いた曲げ材質強度試験の二つの実物試験による計測結果を分析することで津波耐力限界を検討した。引き倒し試験では、海岸樹木の根本回りの倒伏耐力限界を算出し、さらに、生木曲げ材料強度試験では、材料としてのクロ



図-1 現地引き倒し試験実施場所（焼津市田尻）

マツ生木の曲げ強度の耐力限界を算定を行った。

2. 現地引き倒し試験

(1) 試験対象木

海岸林の被害形態として、根返りによる被害の耐力限界を検討するために、現地引き倒し試験を焼津市田尻（図-1）の海岸樹木を対象に実施した。この海岸では、南海トラフ巨大地震による津波の想定に対応するための海岸保全施設として海岸堤防の改良整備事業が国土交通省中部整備局静岡河川事務所により進められている。工事作業に伴う整地に合わせて伐採される予定であった海岸堤防海側のクロマツを静岡河川事務所から提供を受けて、引き倒し試験を実施した。

表-1 に今回の現地引き倒し試験の対象木となった樹木の諸元として、幹径、樹高、樹冠幅、樹勢、地盤の比高の計測値を示す。幹径は 2 から 29cm の間に、樹高は 280 から 730cm の間に分布している。樹木の状態や試験当日の天候と時間の都合により、全ての対象木に対して引き倒し試験を行う事はできなかった。引き倒し試験行った樹木は、①-1、③-2、④-1 の 3 本である（図-2）。その他の対象木の一部については、生木クロマツの曲げ強度材料試験の試験用として用いた。

(2) 引き倒し試験

引き倒し試験では、樹木の幹に地面より 1.2 m の高さにワイヤーをかけ、ワイヤーと引張り型荷重計を繋げて水平方向に引張り、樹木が倒伏する限界までの水平荷重を荷重計により計測し、樹木の移動距離を距離計により計測した（図-3）。この際に、重機をカウンターウェイトとして用いて水平方向に荷重を加えた（図-4）。

表-1 対象木の諸元

樹木 ID	幹径 (cm)	樹高 (cm)	樹冠幅 (cm)	樹勢	地盤の 比高(cm)
①-1	14	600	430	普通	465
①-2	29	590	550	普通	460
①-3	22	660	490	普通	510
②-1	18	570	460	普通	640
②-2	10	640	215	普通	545
③-1	8	500	180	普通	490
③-2	15	710	440	普通	490
③-3	9	490	200	普通	490
③-4	13	550	280	普通	490
③-5	19	730	400	普通	480
③-6	11	610	330	普通	480
③-7	8	560	240	普通	480
③-8	15	640	380	普通	485
④-1	22	560	520	普通	490
④-2	5	280	170	普通	475
④-3	7	300	160	普通	475
④-4	6	280	140	普通	475
⑤-1	11	530	230	普通	475
⑤-2	24	670	600	普通	480

幹径：地盤より 120cm の高さで計測

樹冠幅：一番広がっている箇所を計測

地盤の比高：海岸堤防天端高（TP.62m）からの下がりを計測

樹勢：密生でないため枝葉よく伸びており、全ての樹木を普通と判断



図-2 対象海岸樹木の状況（上：③-2，下：④-1）



図-3 引き倒し試験の状況（上：試験前，下：試験後）

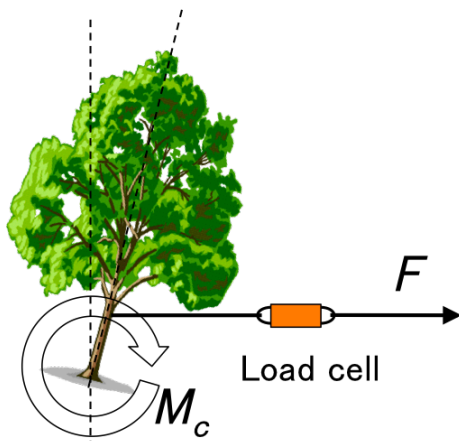


図-4 引き倒し試験の概要

計測は、毎秒の水平荷重と水平変位を同時計測した。これらの計測データより、転倒モーメントを算出した。

(3) 計測結果およびモーメント

図-5 に引き倒し試験の計測結果の例として、樹木番号④-1の計測結果を示す。時間の経過にともない、計測変位が直線的に推移して行くのに対し、引張り荷重は計測開始直後では直線的に推移するが、しばらくすると引張り荷重が大きく変動しない状況になる。この引張り荷重が大きく変動しない時間においても変位は増加している。対象木④-1では、引張り荷重が最大で30kN前

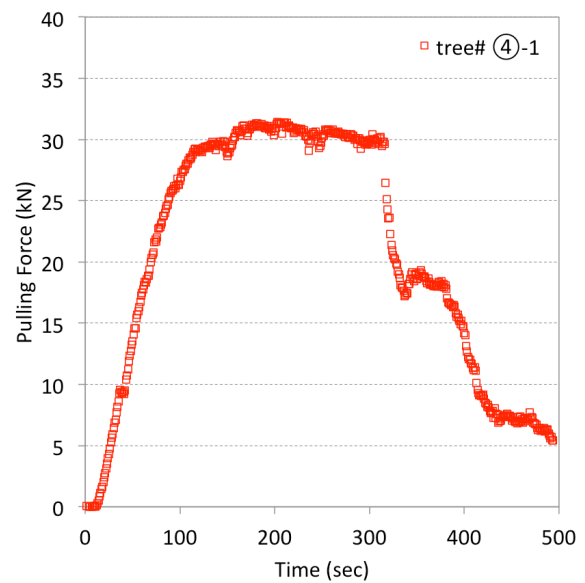
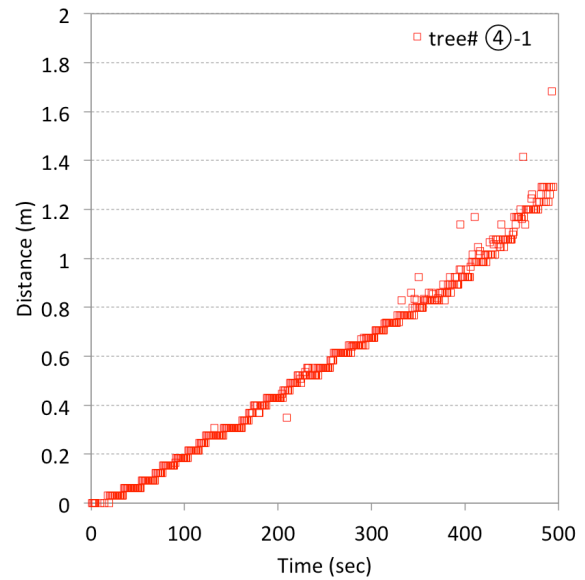


図-5 引き倒し試験の計測結果の例（④-1の結果）
（上：幹の変位，下：引張り荷重）

後で推移した後、大きく引張り荷重が低下しながら大きな変位へ推移している。いずれの対象樹木も一定の引張り荷重で推移する時間で根部と地盤の耐力限界を迎えていると考えられる。

根返り発生の力学的な条件として、海岸林を構成する樹木に対し、津波の浸水深よりも下部の幹や枝葉に津波の流れ方向への流体力が作用することにより、樹木の根本を中心とした回転モーメントが作用することになる。この回転モーメントが樹木を地中で支える根部と地盤の一定の限界値を越える事で、樹木の根返り被害が発生すると考えられる。ここでは、この回転モーメントの限界値を倒伏限界モーメントとし、津波に対する海岸林の耐力限界を根返りによる倒伏限界モーメントで見積もる。

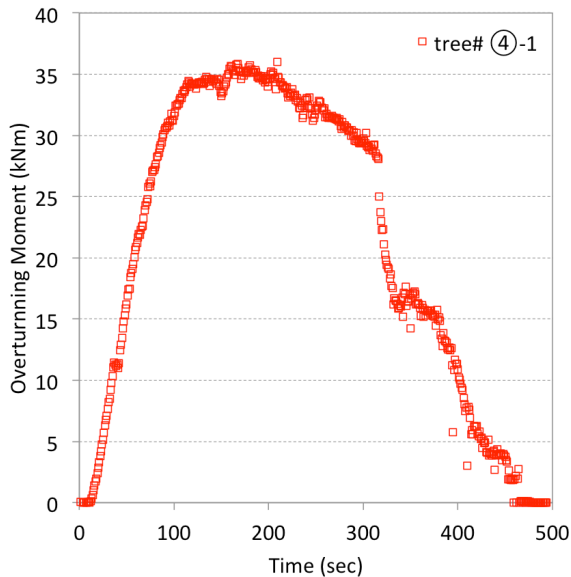


図-6 根本回りの回転モーメント（対象木：④-1）

図-6 に、対象木の根本回りの回転モーメントの算出結果の例として、樹木番号④-1の算出結果を示す。根本回りの回転モーメントは、地盤上 1.2m の高さに水平に作用させた引張り荷重と変位の計測値を用いて、樹木の根本を回転の中心とした場合の回転モーメントを算出している。計測している引張り荷重は水平方向に作用させているため、引張り荷重の作用点を変位すると樹木を回転させる方向の力と樹木を引き抜こうとする方向の力の合力が引張り荷重になる。そのため、引張り荷重と変位データを用いて回転方向の力を求め、回転半径の 1.2m をかけて回転モーメントとして算出した。いずれの対象木についても、上に凸の回転モーメントの分布となっており、最大値を持つ推移となっている。この回転モーメントの最大値を各対象木の倒伏限界モーメントとした。

表-2 に今回の引き倒し試験で得られた、樹木条件と倒伏限界モーメントを示す。倒伏限界モーメントは 5.5 から 35.4kNm となった。幹径が 22cm と最も太い対象木で 35.4kNm と大きな倒伏限界モーメントとなった。この④-1は、樹高は 560cm と高くなく、樹冠幅は 520cm と広がっている。④-1の樹高に対する幹径の比率が 25.5 程度であり、他の①-1、③-2の比率が 42.9、47.3 と比べると小さな値となっている。この数値が大きければ樹木の形状が細長く、小さければ太っている形状であると言える。今回の結果では、樹高に対する幹径が太った形状の海岸樹木で倒伏限界モーメントが大きくなる傾向が見られた。

根返りによる樹木の被害発生条件は、引き倒し試験（例えば Nicoll et al., 2005⁵⁾）により立木根返り発生時の根元を回転中心とした倒伏限界モーメント M_c として計

表-2 樹木条件と倒伏限界モーメント

対象木	幹径, cm	樹高, cm	樹冠幅, cm	倒伏限界モー メント, kNm
①-1	14	600	430	5.5
③-2	15	710	440	6.5
④-1	22	560	520	35.4

測結果が報告されている（今井・鈴木, 2005⁶⁾；近藤ら, 2006⁷⁾；今井ら, 2013⁸⁾；松富ら, 2014⁹⁾；野口ら, 2014¹⁰⁾；鳥田ら, 2014⁴⁾）。これらの事例で示されている倒伏限界モーメントと幹径との関係式と今回の引き倒し試験で得られた転倒モーメントの関係を図-7 に示す。焼津市田尻のデータは調和的な位置にプロットされ、幹径と倒伏限界モーメントの関係も同様の傾向を示している。

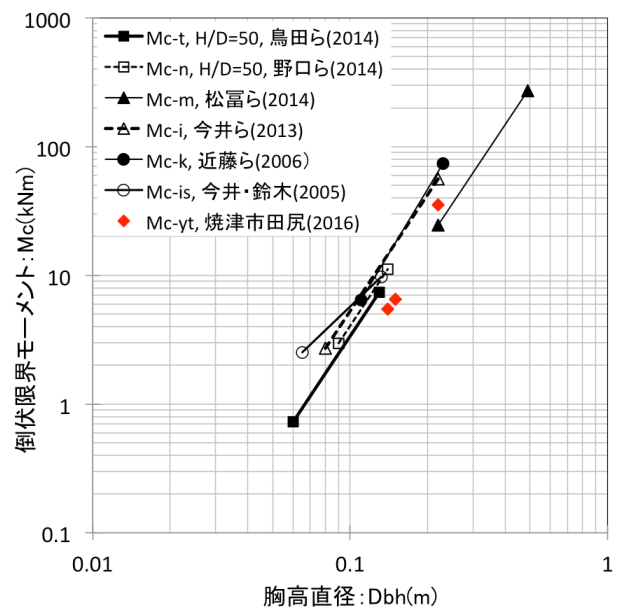


図-7 倒伏限界モーメントと幹径

3. 生木曲げ材料試験

(1) 曲げ材料試験の概要

海岸林の被害形態として、幹の折損や幹折れについて検討する。幹の折損、幹折れが発生する力学的な条件として、根本が地盤に固定された片持ち梁の様な状態の幹に対して、津波の流れ方向の流体力の作用により、幹の断面に作用する曲げモーメントが生木樹木の材料としての曲げ強度を越える事により被害が生じると考えられる。ここでは、海岸林の生木を試験試料として用い、3等分点4点曲げ法による材質強度試験を行い、海岸林の幹の折損・幹折れ等による材料としての曲げ強度等の耐力限界を検討する。一般に製材として用いられる乾燥させた材木の曲げ強度等の性質は研究が行われているが、

ここでは生育している海岸林を対象とするため生木を試料として用いた。

海岸林現地引き倒し試験において国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所より提供を受けたクロマツの生木を用いて曲げ強度試験を実施した。曲げ強度試験は、静岡県農林技術研究所森林・林業研究センターにおいて委託試験として実施した。曲げ強度試験は、実大材料強度試験機（UH-100kNIR、島津製作所）および接合試験機（千代田製作所）を用いて、構造用木材の強度試験マニュアル（財団法人日本住宅・木材技術センター）のI7.曲げ強さの試験に準じて行った。2000mm 未満の丸太は接合試験機を用いて支点間スパン 1050mm の3点荷重方式で行った。2000mm 以上の丸太は、支点間スパンを2400mm、荷重点間スパンを 800mm とする4点荷重方式で行った（図-8, 9）。

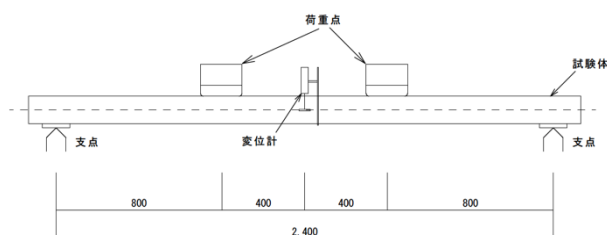


図-8 実大木材曲げ試験の概要図



図-13 実大木材曲げ試験の実施状況

(2) 計測結果

図-10 に計測結果の例を示す。比例域における上限荷重および下限荷重、これらに対応するたわみ、最大荷重を測定し曲げ強さを求めた。試験体が不整形円柱のため、支点上で十分な安定が得られなかったため、荷重変位曲線からのヤング係数の算出は行わなかった。今回の曲げ強度試験では、焼津市田尻の海岸に自生していたクロマツの幹材を切り出して搬入し、そのままの状態試験体として用いた。このため、不整形円柱の形状となつてし

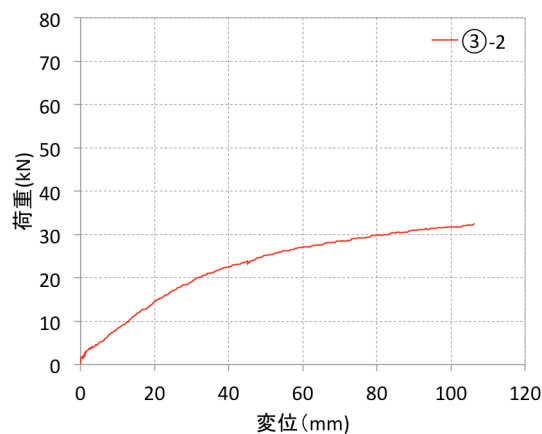


図-10 計測結果（変位-荷重）の例（③-2）

表-3 試験体の形状と曲げ強度試験の結果

試験体 No.	直径(mm)			密度 kg/m ³	最大 荷重 kN	曲げ 強度 N/mm ²
	元口	中央	末口			
①-1	143	137	99	946	23.7	24.7
③-2	222	163	118	905	32.4	30.5
③-4	1226	97	95	1098	14.8	42.8
③-5	233	201	169	966	65.4	32.7
③-6	153	129	115	889	25.3	31.3
③-8	125	98	76	1188	11.5	32.6
⑤-1	62	48	34	1180	2.6	62.5
⑤-2-2	195	171	146	1035	52.9	28.5

まい計測が十分に行えなかった可能性が残る。今後の課題として生木の形状を成形した試験体で曲げ強度試験を行うなどの工夫が必要と考えられる。

表-3 に試験体の形状と曲げ強度試験の結果のまとめを示す。試験体の形状は試験体ごとに異なっているが、密度は 889kg/m³ から 1188kg/m³ の範囲となった。一般的な気乾木材としてのマツ材は、比重が 0.4 から 0.6 程度であるが、今回の生木のクロマツはこれと比べると水分を多く含んでおり密度が高い事が分かる。最大荷重は、試験体の形状の影響があるため、2.6kN から 65.4kN の範囲にバラツキが見られる。

幹断面に作用する曲げモーメントと断面係数から曲げ強度を求めた結果、24.7N/mm² から 62.5 N/mm² の範囲となった。1.0N/mm² は 1.0MPa であるため、既往の研究で得られている 28.3MPa から 50MPa 程度の曲げ強度と比べ同程度の曲げ強度であったと考えられる。曲げ強度は、材料としての曲げモーメントの強度を表すため、樹木の種類や成育環境の違いによる年輪や密度などの条件により変化すると考えられる。今回の検討では細かな条件の違いについては、十分に考慮する事ができなかったが、平均値として 35.7MPa の曲げ強度となった。この曲げ強度の数値は、異なる場所で得られた他の研究の数値と比べ調和的な値であると考えられる。今回、8本の試験体

を用いて計測を行う事ができた。既往の研究で課題となっていた試験体数の不足に対して、試験体数を8本で平均を求めた結果はちょうど中間的な値となった。今回得られた曲げ強度により、幹断面の曲げ強度耐力限界を評価する事で幹折れや折損の力学的な評価がある程度可能になった。

4. 海岸林耐力限界の評価モデルの検討

上記の試験により得られた結果をもとに、海岸林の力学的な耐力限界について、倒伏限界モーメントと幹断面曲げ強度の二つの指標を用いる事で海岸林耐力限界の評価を定量的に検討することが可能となった。

倒伏限界モーメントについては、他の研究などと同様に樹木の形状を代表するパラメータとして幹径の3乗を採用すると、焼津市田尻で得られたデータに基づく倒伏限界は $M_{crf}=2.6 \times 10^3 \times Dbh^3$ とモデル化する事ができる。このモデル式は、今井ら(2013)と松富ら(2014)のモデルのパラメータの中間の数値を取る。この事より、研究で得られたモデルは他の地域に適応した場合においても、評価に用いる事ができると考えられる。

また、幹折れや折損の評価手法として、幹断面の曲げ強度の平均的な値として $35.7MPa$ の数値を得る事ができた。この数値を耐力限界として樹木と津波の条件から評価する事で、津波による幹折れ、折損の評価を検討する事が可能になった。

ただし、これまでに述べた様に、今回の計測結果については幾つか更なる検討を要する事項があるため、データ数を増やすとともに更なる検討も必要と考えられる。

5. おわりに

海岸林の津波耐力限界について、力学的な条件を考慮した実験計測に基づいて、定量的な評価に必要なパラメータを設定する事ができた。これにより、今後、津波災害が想定される地域の海岸林の保全・管理・整備において、海岸林が流失し、漂流物として被害拡大に繋がる可能性を検討する事ができる様になると考えられる。巨大な津波が想定される地域において、今回開発したパラメータを用いた評価手法を用いる事で、海岸林被害の可能性を評価でき、海岸林の管理、整備、保全の見直し

等により事前対策で、海岸林の漂流物化による被害拡大の軽減に貢献できると考えられる。

謝辞：本研究は、新技術開発財団植物研究助成の成果の一部である。現地引き倒し試験では、国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所に、生木曲げ試験では、静岡県農林技術研究所森林・林業研究センターに協力を得て実施した。ここに記して、感謝を表する。

参考文献

- 1) 首藤伸夫：防潮林の津波に対する効果と限界，海岸工学講演会論文集，32，465-469, 1985.
- 2) 原田賢治，松富英夫：津波による直接的な海岸林被害条件に関する基礎的検討，日本地震工学会，年次大会梗概集，pp. 4-5, 2012.
- 3) Harada Kenji : Study on the damage conditions of coastal tree by tsunami – the case study in Shin-Maiko coast, Fukushima Prefecture, International Tsunami Symposium, pp57, 2013.
- 4) 鳥田宏行，佐藤創，真坂一彦，阿部友幸，野口宏典，坂本知己，木村公樹：簡易モデルを用いた津波に対する立木の抵抗性の評価，日本森林学会誌，96(4)，206-211, 2014.
- 5) Nicoll, B. C. , Achim, A. , Mochan, S. and Gardiner, B. A. , Does steep terrain influence tree stability? Afield investigation, Canadian, Journal of Forest Research, 35, 2360-2367, 2005.
- 6) 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，体積評価法とその倒伏耐力，水工学論文集，49，859-864, 2005.
- 7) 近藤観慈，小山美香，野々田稔郎，林拙郎(2006)：海岸クロマツ林の津波を想定した外力に対する根系抵抗力，日本森林学会大会学術講演集，117，G03，2005.
- 8) 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 (海岸工学)，69(2)，I_361-I_365，2013.
- 9) 松富英夫，原田賢治，鴨澤明志，決得元基，嶋津朋，力の作用高さ，生存・枯死，生育場所からみた三陸海岸黒松の被害条件，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，70(2)，I_366-I_370，2014.
- 10) 野口宏典，鈴木覚，南光一樹，竹内由香里，金子智紀，新田響平，渡部公一，坂本知己，海岸砂丘に植栽された広葉樹およびクロマツの倒伏抵抗特性の引き倒し試験による評価，海岸林学会誌，13(2)，pp. 59-66，2014.