

# 津波防潮林の損傷評価を目的とした海岸林樹木の波力に対する応答解析

## Dynamic Analysis on Coastal Tree Structures under Wave Action Aiming at Damage Evaluation of Tsunami Barrier Forests

浅野敏之<sup>1</sup>・國生大樹<sup>2</sup>・山本洋平<sup>3</sup>

Toshiyuki ASANO, Taiki KOKUSHO and Yohei YAMAMOTO

Referring field observation data on tree configurations consisting of coastal forests and invoking knowledge developed in tree morphology, a typical structure of coastal pine trees was determined. The dynamic responses of the tree structure against sinusoidal wave motions were computed by modeling the tree into a lumped mass system. The temporal variations and spatial distributions of the horizontal displacement and bending stress of the trunk and branch elements were analyzed. Sensibility analyses were conducted by changing the input parameters such as incident wave height, period and loading weight due to the leaves in the crown part. The obtained results on the maximum bending stresses can be utilized for the damage analysis of the tsunami barrier forests under tsunami attack conditions.

### 1. はじめに

近年、海岸林を津波防潮施設として利用することが、環境と防災を両立させる対策として注目を集めている。インド洋大津波におけるマングローブ林の現地調査などから、津波外力による樹木の枝や幹の折損、根返りなどの被害状況が定量的にもかなり理解されるようになった(例えば、岡田ら,2009)。津波外力によって倒木・折損が発生すると、当初見込まれた減災能力が低減する可能性があり、海岸林による津波防潮能力の評価にあたって、樹木の幹・枝などの各器官に津波流体力がどのように作用するかを明らかにしておく必要がある。樹木の形状は、樹種や樹齢、環境条件によってさまざまなように見えるが、樹木形態学によれば、幹や枝の断面積や分岐角、枝の断面積と葉の重量等の間に、樹木内部の導水機能や力学的支持機能に基づいた普遍的な関係が存在することが明らかにされている。本研究は、樹木形態学の知見を援用して設定した樹木模型に波浪流体力を作用させたときの応答を、多質点系構造物としての数値解析により考察したものである。

### 2. 樹木形状の普遍的特性に関する研究の整理

樹木は、それぞれの種によって枝振りが違っており、同じ樹種でも生育環境によって樹形は変化する。コンクリートや鋼材など無機人工物を主対象とする工学者には、樹木形状の個別的な多様性がファジーなものに感じられ、その形状の背後に普遍的な特性があることを見逃

しがちである。しかし樹木形態学では、樹木の幹枝構造が、いかにして光を効率的に獲得するか・葉からの蒸散をまかなう水の通り道を確保するか・樹冠部などの重量を支える強度を確保するか、等の機能的・構造的な要請から決定されると考えられている。日本生物科学者協会(2003)は、「樹木の形作りと生き方」の特集を組み、樹木形態の機能的・定量的解明についての研究の現状を整理している。こうした研究成果は、海岸林の津波防潮施設としての応用を考えるにあたって有用であり、以下にいくつかの知見を紹介する。

幹から枝、一次枝から二次枝への分岐における断面積の保存則は、優れた科学者でもあったレオナルド・ダビンチの記述に残されており、現在の樹木形態学の教科書にも示されている(Tyree - Zimmermann, 2002)。樹木は根から吸収した水分を幹・枝を通じて葉から蒸散するから、樹形を水輸送のネットワークと考えることができる。浅野ら(2007)は樹木の分岐における断面積保存則が、水理学上の分岐管路の連続式に相当することを指摘するとともに、さまざまな樹種の分岐前後の幹・枝の直径の測定結果から、この保存則が針葉樹・広葉樹を問わず成立することを確かめた。Shinozaki et al. (1964)は、ダビンチの見出した単純パイプモデルを精密化し、単位パイプを束ねた複合パイプモデルを提案した。幹の断面形状が根本に近づくほど太くなる性質は、不用パイプが幹株に残されることで説明される。

枝の直径とその枝についている葉の量も、枝を構成する個々の単位パイプが葉に繋がって水分を通過していると理解すれば、両者の間に比例関係が成立することが容易に推察できる。Suzuki - Hiura (2000)による測定結果(図-1)では、葉重量は1次枝の直径の2乗(すなわち断

1 正会員 工博 鹿児島大学教授 大学院理工学研究科  
2 学生会員 鹿児島大学 大学院理工学研究科  
3 工修 JR西日本

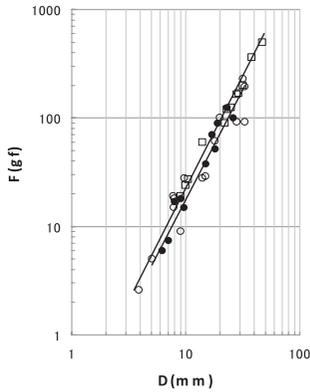


図-1 葉部の重量とそれを支える枝直径の関係 (Suzuki - Hiura; 2000)



写真-1 実樹木

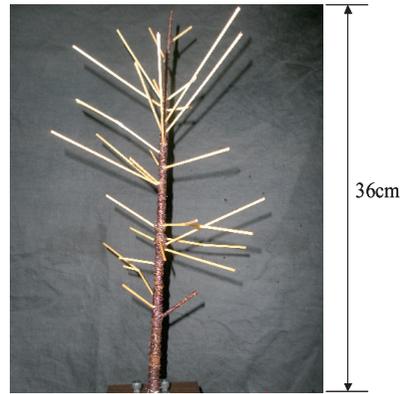


写真-2 実樹木の幹枝構造の測定結果に基づいて製作した模型樹木

面積)に比例することが示されている。城田・作田(2003)は樹形のパイプモデルが樹木の幹・枝・葉の形状を定量的に表現する有用なモデルであることを解説している。

### 3. 樹木形状モデルの作成

#### (1) 樹木形状の現地観測

樹木形状の観測は、2008年12月に鹿児島県大崎町「くこの松原」において実施した。この海岸林は志布志湾に面した延長約10km、林帯幅10~100mの防風防砂を目的としたクロマツ林である。観測は、立木密度の異なる5m四方の3プロットを設定し、樹高、胸高直径、枝下高、樹冠幅、樹冠長などを測定した。これら樹木諸量は立木密度によって影響を受け、これについての考察は瀬戸

口・浅野(2009)が行っている。多数の樹木形状の測定結果から、この海岸林の代表的な幹・枝の形状を有する1本のクロマツを選び(写真-1)、幹の直径、枝の幹からの分岐高、分岐角、枝の直径などを詳細に計測した。枝が幹から分岐する位置や伸張する枝先端の位置は、ノンプリズム型トータルステーションを用い、レーザービームを照射することで求めた。

#### (2) 模型樹木に作用する流体力の計測実験と数値解析

上述の実樹木の3次元樹形構造の測定結果に基づいて、実験水槽で流体力を計測するための縮尺1/30の模型樹木を製作した(写真-2)。この模型樹木を2次元造波水槽内に設置し、波・流れ・津波を模した段波を作用させ、その時の流体力を3分力計によって計測した。この樹木模型を単純化した樹木モデルを4.に後述する多質点系構造物に置き換え、波動外力に対する応答計算を実施した。実験で得られた樹木に作用する底面周りの最大曲げモーメントの値は、数値解析結果と良く一致し、解析の妥当性が明らかにされた。実験の詳細ならびに模型樹木に対する実験結果と解析結果の比較検討については山本ら(2010)を参照されたい。

#### (3) 多質点系樹木モデルの設定

多質点系構造解析に用いる樹木モデルは、計算負荷を考慮2次元とし、図-2に示すように全高13mの実寸大の樹木模型に、図の左側から波力を受けるときの面内振動を解析するものとした。節点数は27、要素数26で、地面位置における節点20は固定とする。このモデルの設定には、前述の樹木形状の現地観測結果に依拠しつつも、一般性を考えて枝の形状・寸法の細部にわたる変化は無視し、一部データを修正した。

表-1に示すように幹と枝の直径は、分岐前後で断面積保存則が成立するように設定した。例えば幹部の要素7の断面積0.071m<sup>2</sup>は分岐後の幹要素6の断面積0.063m<sup>2</sup>、

表-1 数値解析に用いた樹木模型の直径の設定

要素番号	直径 D(cm)	断面積 A(cm <sup>2</sup> )
1~2	23.9	448.4
3	25.3	502.5
4~5	26.8	563.8
6	28.3	628.7
7~13	30.0	706.5
14~15	8.3	54.1
16	3.0	7.1
17	9.3	67.9
18~19	9.8	75.4
20	3.0	7.1
21	8.3	54.1
22	8.8	60.8
23	3.0	7.1
24	8.5	56.7
25~26	9.0	63.6

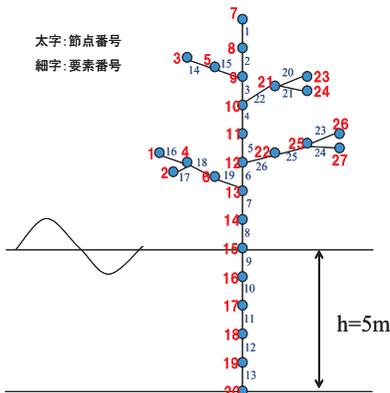


図-2 多質点系樹木モデル

枝要素19の断面積0.008m<sup>2</sup>の和と等しくした。枝の端点で与えた上載荷重は、Suzuki - Hiura (2000) の枝直径と葉重量の関係を参考にした。幹から直接分出している大枝ユニットの枝直径、枝の長さ、枝の分岐角は林木育種センター (2004) が示す形状指標に矛盾しないよう設定した。クロマツ樹木の材料特性は、生木の状態では個々の樹木の生育環境や樹木の部位などによってさまざまに変化することが予想され、これに関する信頼すべき知見も見当らないことから、本研究では乾燥後の木材として公表されている値 (比重0.57, ヤング率9.8GPa) を採用することにした。

#### 4. 多質点系構造解析による樹木に作用する流体力の数値解析

多質点系構造物の運動の基礎方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{F\}$ は、それぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックス、外力であり、 $\{u\}$ は $x, z$ 方向の変位とたわみ角で構成される変位ベクトルである。水中の物体に作用する波力を評価する際にモリソン式を用いた場合、外力 $\{F\}$ は水粒子速度の2乗に比例する抗力と加速度に比例する慣性力の和で構成される。水粒子と振動する構造物の相対速度を考慮して、 $\{F\}$ は次式で表される。

$$\{F\} = [C_M]\{\dot{v}\} - [C_m]\{\ddot{u}\} + [C_D]\{\dot{v} - \dot{u}\}(\dot{v} - \dot{u}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $\dot{u}$ 、 $\ddot{u}$ 、 $\dot{v}$ 、 $\ddot{v}$ は、それぞれ、運動する構造物の速度、加速度、水粒子の速度、加速度であり、 $C_M$ 、 $C_m$ 、 $C_D$ は、それぞれ慣性係数、付加質量係数、抗力係数である。左辺第3項は非線形であり、等価線形化を行った。構造物の動的応答が線形の範囲にあるものとし、モード合成

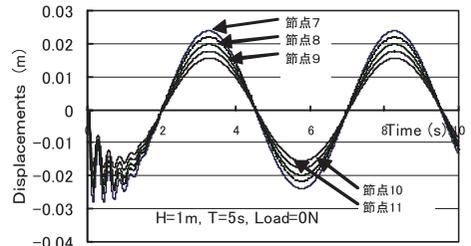


図-3 樹木幹部節点の水平変位の時系列

法による解析を行った (中井・小林, 1983, 石田, 1984)。モード合成法で得られる構造物の動的変位は、線形重合の考えから固有値と固有ベクトルに基づき次式で表される。

$$\begin{aligned} \{u(t)\} &= [\Phi]\{q\} \\ &= \{\phi_1\}q_1(t) + \{\phi_2\}q_2(t) + \dots + \{\phi_N\}q_N(t) \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここに $[\Phi]$ はモーダルマトリックス、 $\{q\}$ は標準化した変位ベクトルである。動的応答の時間発展計算はニューマークの $\beta$ 法を用いた (平岡, 1999)。

#### 5. 解析結果ならびに考察

##### (1) 計算条件

図-2に示した全高13mの樹木が $h=5m$ まで浸水した状態を考え、これに正弦波が作用するときのモデル樹木の面内振動について、応答変位と樹木内応力を計算した。来襲波の波高は $H=1\sim 3m$ 、周期は $T=5\sim 15s$ の範囲で系統的に変化させて与えた。抗力係数 $C_D=1.0$ 、慣性係数 $C_M=2.0$ とした。さらに葉群の重量が各枝部の先端要素に上載荷重として作用する計算ケースを設定した。

##### (2) 計算結果

図-3は幹部の節点について水平変位の時系列を示したものである。静水時から正弦波を作用させたため、最初の部分で短周期の振動が見られるが、すぐに減衰し、基本的に外力である正弦波の周期で振動していることがわかる。

図-4は波浪を作用させたときの樹木モデルの幹部の最大水平変位を、横軸に地面からの高さをとって示したものである。樹木は基本的に地面において拘束された片持ち梁の振動をするため、横軸の増加とともに水平変位が増加する。波高の増加 (図-4a)、周期の増加 (図-4b) とともに最大水平変位は大きくなる。樹冠部葉群による上載荷重が増加すると、水平変位はわずかに減少する (図-4c)。また水平変位の最大値は、本計算条件の範囲である、浸水深 $h=5m$ 、波高 $H=1\sim 3m$ 、周期 $T=5\sim 15s$ 、上載荷重 $0\sim 150N$ では、0.15m以内の大きさとなった。

樹木幹部に作用する最大曲げ応力は、図-5に示すよう

に、最大水平変位と同様に波高が大きいほど、周期が長いほど、上載荷重が小さいほど大きくなり、本計算条件の範囲内では10MPaを超えない大きさとなった。幹の高さに沿った最大曲げ応力の分布は、一つの節点を介して上部要素下端と下部要素上端で応力が一般に不連続となるためジグザグの形状をとるが、基本的には横軸とともに減少する。しかし、枝が分岐する高さ7m, 8m地点では枝からの曲げ応力の影響を受け、単調減少ではなく一旦わずかに増加することが認められた。この枝からの曲げ応力の影響は、葉群の上載荷重を考慮しない方が大きいことがわかった。

幹部に枝部を加えた樹木全体の最大曲げモーメントの分布を図-6に示す。図-2に示したように全高13mの樹木が静水深5mで水没した条件下では、波高1~3mの正弦

波外力によっては枝部に直接波が当たらず、幹部に波浪が作用し樹木全体が振動することを通じて枝部に曲げ応力が発生することになる。図-6(a)は葉群による上載荷重が無い場合の結果であるが、枝が取り付けられている要素番号15や19~21, 23で大きな最大曲げ応力が発生している。図-6(b)は図-6(a)より波高 $H$ を3mと大きくするとともに、葉群の上載荷重80Nを先端の枝要素に作用させたものである。要素21と要素23では葉群の上載荷重のために、きわめて大きな曲げ応力が生じる結果となった。それ以外の枝節点では図-6(a)より大きな曲げ応力となっており(図-6(a)と(b)では縦軸の絶対値が異なることに注意)、また幹部でも波高が増加したことにより曲げ応力が全体に少し増えることが認められた。

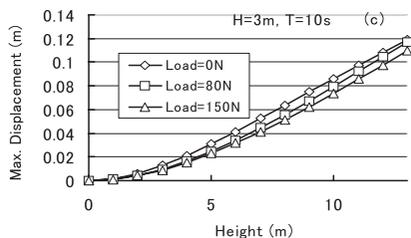
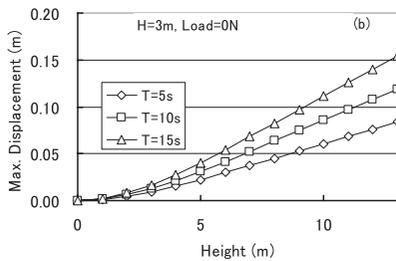
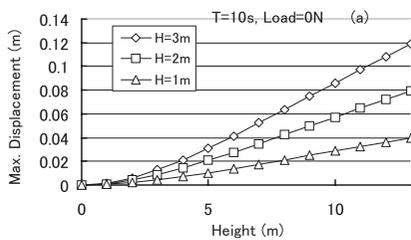


図-4 幹部節点の最大水平変位

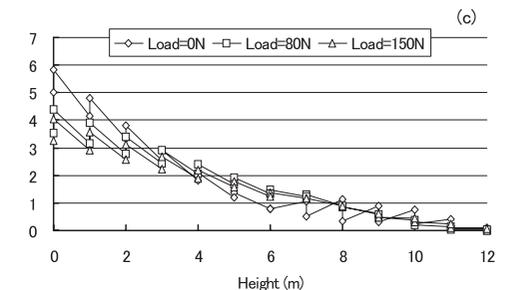
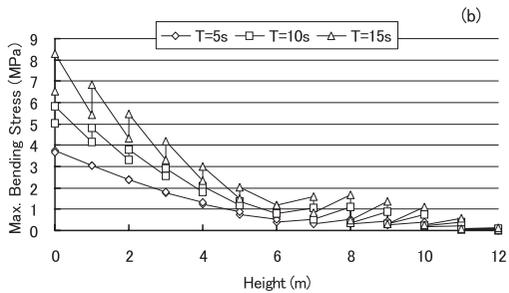
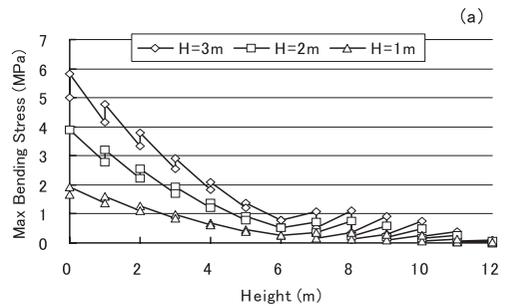


図-5 幹部節点の最大曲げ応力

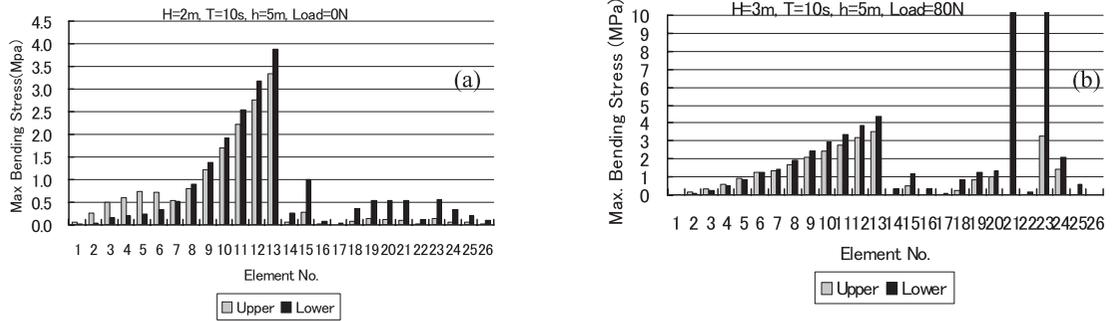


図-6 幹・枝部に作用する最大曲げモーメントの分布

## 6. まとめ

現地での樹木の幹・枝構造の測定結果と、樹木形態学の知見を踏まえて、形状・直径・葉重量などについてモデル化した多質点系構造物を設定し、これに正弦波力が作用するときの各要素の水平変位や最大曲げ応力の分布についての数値解析結果を示した。波高、周期、葉群がもたらす上載荷重といったパラメータを変えたときの、振動変位や曲げ応力の変化を明らかにするとともに、枝が接続する幹部節点では枝から伝わる曲げ応力の影響を考察した。また、枝部要素に発生する最大曲げ応力の分布についての計算結果を提示した。計算された最大曲げ応力と樹木の持つ最大曲げ強度との大小関係から、樹木の枝部の折損の可能性が議論できる。

本解析の範囲では、津波を単純な正弦波で表現していること、樹木へ流体力の作用する範囲が限定されていること、多質点系構造物のモデル化が2次元に留まっていることなど、精密化すべき課題も残されており、今後の課題とした。

## 参考文献

- 浅野敏之・藤宮祐介・伊藤 暖 (2007): 樹木形態学に基づいた海岸林の津波減衰率の評価, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.776-780.
- 石田 啓 (1984): 波による柱状構造物の動的応答について, 水工学夏期研修会講義集, B-4-1~B-4-15, 1984.
- 岡田 稜, 坂本知己ら (2009): スリランカ南部 Tangalla における2004年インド洋大津波による被害状況と海岸地形の関わり, 海岸林学会誌, Vol.8 (2), pp.58-63.
- 城田徹央・作田耕太郎 (2003): 「樹形のパイプモデル」は「樹形」をどこまで説明できるであろうか, 生物科学, 第54巻, 第3号, pp.163-171.
- 瀬戸口修造・浅野敏之 (2009): 海岸林を遡上する津波の減衰に関する数値シミュレーション, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.75-80.
- 中井 博・小林治俊 (1983): 土木構造物の振動解析, 森北出版, 270p.
- 日本生物科学者協会 (2003): 樹木の形作りと生き方, 「生物科学」, Vol.54, No.3, pp.129-192.
- 平岡克己 (1999): 振動解析, 応用数値計算ライブラリ, 朝倉書店, p.114.
- 山本洋平・浅野敏之・林建二郎 (2010): 海岸林樹木に作用する流体力に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第35巻 (印刷中)
- Shinozaki, K., K. Yoda, K. Hozumi, and T. Kira (1964): A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory, Japanese Journal of Ecology, Vol.14, pp.97-105.
- Suzuki, M. and T. Hiura (2000): Tree Physiology, Vol.20, pp.203-209.
- Tyree M.T. and M.H. Zimmermann (2002): Xylem structure and ascent of sap, Springer Series in Wood Science, 283p.