

海岸林樹木に作用する流体力に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY OF HYDRODYNAMIC FORCES ACTING ON COASTAL TREES

山本洋平¹・浅野敏之²・林建二郎³
Yohei YAMAMOTO, Toshiyuki ASANO, Kenjiro HAYASHI

¹正会員 工修 JR 西日本(〒530-8341 大阪市北区芝田 2 丁目 4-24)

²正会員 工博 鹿児島大学大学院理工学研究科海洋土木工学専攻(〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

³正会員 工博 防衛大学校システム工学群 建設工学専攻(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

Utilizing coastal forests as a counter measure against tsunamis has attracted coastal engineers and practitioners, because coastal forests have concurrent benefits both of disaster prevention and environmental preservation. This study started by carefully measuring on the trunk-branch configurations of a real coastal tree and reproducing it in the model tree. Then, a series of hydrodynamic force measurements was conducted using a multi component load cell under wave, current and hydraulic bore fields. The characteristics of the hydrodynamic coefficients and the dynamic response of the tree were investigated. Finally, a numerical analysis modeling a tree into the lumped mass system was conducted to study the dynamic response and internal stress field of the trees. By comparing the numerical results to experimental ones, the validity of the experiments was discussed.

Key Words: *coastal forests, hydrodynamic forces, dynamic response against waves, tree morphology, tsunami barrier forests*

1. はじめに

約 25 万人の犠牲者を出した 2004 年のインド洋津波において、海岸のマングローブ林の持つ津波減衰効果が注目されている。マングローブやマツ林などの海岸林の建設は、平常時には景観や生態系に便益を与えるため、防災と環境を両立させる魅力的な津波防災対策と言える。既往の研究では、海岸林の流体抵抗について幹の流体抵抗のみを評価対象としたものがほとんどであり、樹木の形状特性まで考慮した研究は、浅野ら¹⁾を除いてほとんど見あたらない。しかし、海岸林の津波防災効果には、枝や樹冠部の流体抵抗が幹のそれを上回ることも十分に予想され、また津波外力による幹や枝の折損が津波防潮林の防災効果の低減に及ぼす効果(柳澤ら²⁾、今井³⁾についても明らかにする必要がある。

そこで本研究では、実際の樹木を詳細に測量し、それを忠実に再現した模型樹木を製作することから研究を開始した。多数の枝を持つ模型樹木に対して、波や一方向流、津波を擬した段波を作用させたときの流体力を測定しその特性を明らかにする。また、実験結果の妥当性を検討するために、樹木を多質点系構造物として取り扱い、波による幹や枝の変位応答と内部応力を解析し、実験結果と比較検討する。

2. 模型樹木を用いた流体抵抗の計測

(1) 実樹木の測定と模型樹木の製作

樹木形状の観測は、2008 年 12 月に鹿児島県大崎町「くいの松原」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。観測地点は「くいの松原キャンプ場」付近で、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。これら樹木諸量と立木密度の関係については瀬戸口ら⁴⁾に報告されている。

多数の樹木形状の測定結果に基づき、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。これらの計測にはデジタル測高器や測桿など樹木測定専用の器具(大隅⁵⁾)も使用したが、土木測量で用いるノンプリズム型トータルステーションを用いて、枝が幹から分岐する位置や伸張する枝先端の位置をレーザービームを照射することによって、簡便かつ精密に樹形構造を求めることができた。

この実樹木の 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模型樹木

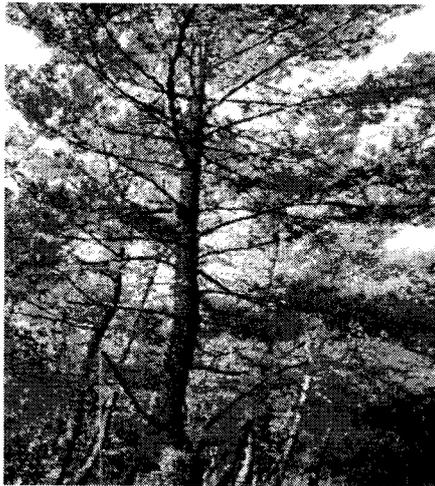


写真-1 実樹木

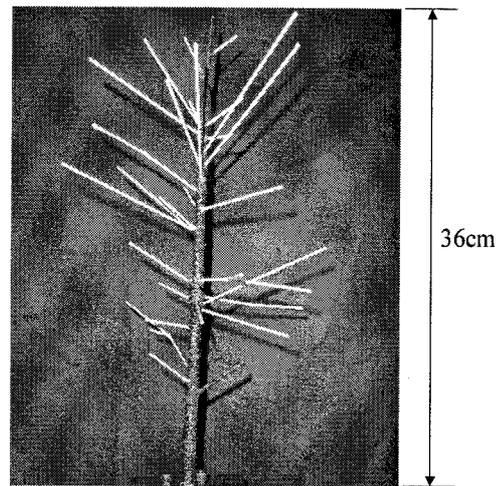


写真-2 模型樹木

を製作した(写真-2). 縮尺は実物の 1/30 と設定したため, 模型樹木の全高は 36cm となった. 材料は模型工作で用いる木材円柱であり, 枝部は直径 0.2cm, 幹部は後述するワイヤーを巻いた後の状態で直径が 1.2cm とした. 幹から枝が分岐する位置・角度については, 実物と一致するよう入念な工作を行ったが, 幹部と接着剤で接合するのは流体力を受ける状態では強度が足りないため, 枝と幹の接合部を含めて幹部全体に強度確保のためのワイヤーを巻き, 枝と幹の強固な接合を実現した.

(2) 流体力測定実験の概要

実験は, 防衛大学校建設工学専攻が保有する長さ 40m, 幅 0.8m, 高さ 1m の吸収造波式 2 次元水槽を使用した(図-1). 模型樹木を造波装置から 16m の地点に設置し, これに作用する流体力を三分力計(三計エンジニアリング(株), 容量 2kgf)によって計測した. この水槽は 2 重底となっており, 模型樹木と三分力計は図-2 のように結合されている. そのため,

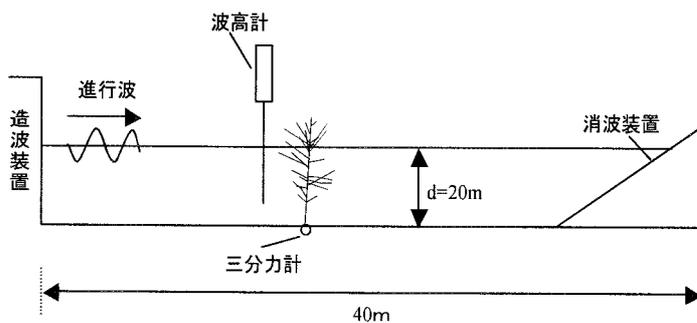


図-1 実験水槽

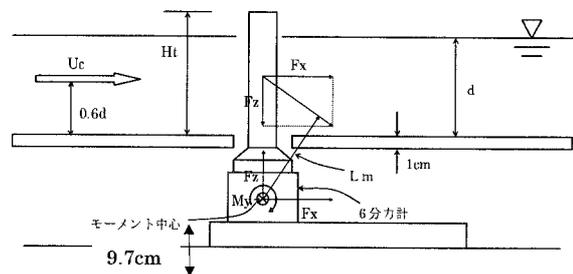


図-2 模型樹木と三分力計の取付け状況

樹木に作用するモーメントは 2 重床部の取り付け部分のアームレングスが加わった形となるので, 樹木に作用する正味のモーメントを算出するには補正が必要となる. 写真-3 に模型樹木と三分力計の設置状況を示す. この設置方法によれば模型樹木に作用する流れ方向に作用する流体力 F_x , 鉛直方向に作用する流体力 F_z , 流れ方向に作用するモーメント M_y が計測できる. 樹木近傍の水粒子速度の測定には, 2 成分のレーザードップラー流速計を用い, 樹木幹部の

20cm 前方, 水路底から 15cm の位置で計測した. 水面変動は樹木幹部から 18cm 前方に設置した容量線式波高計によって計測した.

波, 一方向流れ, 津波を模した段波の 3 種類について, 模型樹木に作用する流体力計測実験を行った. 波については規則波を用い, 水深 d は 20cm と一定とし, 周期 T を 0.8~7.0 s の範囲で 11 ケース設定し, それぞれのケースで波高 H を変化させた. 一



写真-3 模型樹木と3分力計の設置状況

方向流れについては、水槽底部に設置されているポンプを用いて実験水槽内に循環流を形成させた。津波を模した段波の実験は、一方向流れを水槽端部で板でせき止め、これを一気に引き上げることで段波流れを発生させた。この場合は、水面前面が切り立った段波が模型樹木に作用し、衝撃的な流体力が発生する。林⁶⁾は、堰堤や直円柱に段波を作用させ、その衝撃的流体力を6分力計で測定した実験結果を示すとともに、外力である衝撃流体力の周波数特性と測定系である分力計の固有周波数との応答特性について考察している。衝撃的流体力の計測においては、固有周波数が十分高い分力計が必要であることが示されているが、今回用いた分力計の固有周波数は50Hzであり、十分な精度を有していた。

(3) 流体力係数の解析

抗力係数 C_D を求めるためには没水深での樹木模型の投影面積を求める必要がある。まず写真-2 に示した樹木模型の画像の2階調化を行い(写真-4)、次に画像解析ソフトを用いて鉛直セグメント dz ごとの樹木模型の投影面積を求めた。この投影面積より、枝と幹を束ねた状態に対する各セグメントの等価幹直径 D^* が算出され、この D^* を用いて K.C. 数を計算した。幹基部の直径 D が 1.20cm であったのに対し、鉛直平均した D^* は 1.62cm であった。

波動外力の実験解析においては、モリソン式中の抗力係数 C_D 、慣性係数 C_M を、それぞれ流速 u 、加速度 $\partial u / \partial t$ が最大となる位相時の流体力 $(dF_x)_1$ 、 $(dF_x)_2$ から求めた。

$$(dF_x)_1 = \rho C_D \frac{|u_{\max}|}{2} u_{\max} D dz \quad \dots (1)$$

$$(dF_x)_2 = \rho C_M \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_{\max} \frac{\pi D^2}{4} dz \quad \dots (2)$$

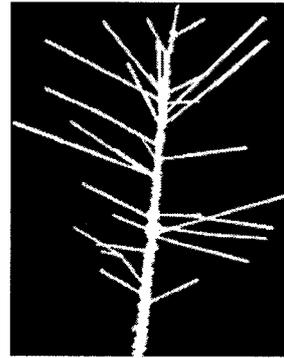


写真-4 樹木模型画像の2階調化

3. 実験結果ならびに考察

(1) 波の作用実験

周期 $T=0.8 \sim 7.0s$ の規則波を樹木模型に作用させた場合の、抗力係数 C_D 、慣性係数 C_M と K.C. 数の関係をそれぞれ図-3、図-4 に示す。図中には Sarpkaya⁷⁾ が振動流中に置かれた単円柱に作用する流体力から求めた C_D 、 C_M と K.C. 数の関係を示した。実験結果の C_D は 1.5 を中心に分布し、K.C. < 40 では振動流で得られた既往の知見と良く一致してい

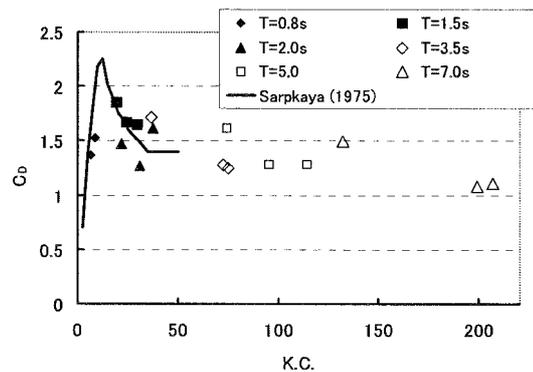


図-3 抗力係数と K.C. 数の関係

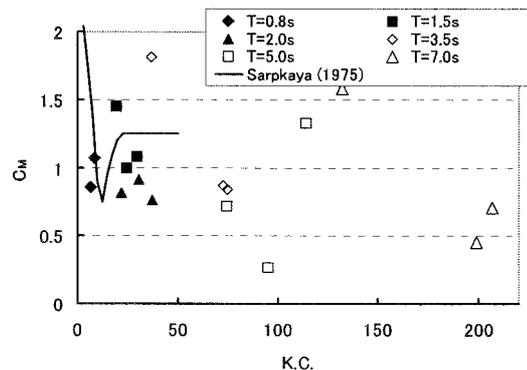


図-4 慣性係数と K.C. 数の関係

る。 C_M については、K.C.数が大きくなると定常流に近い状態となり慣性力自体が相対的に小さくなるためばらつきが大きくなるが、全体としては1.0を中心とした範囲に分布している。樹木のような複雑な3次元形状物体についても、得られた C_D 、 C_M の値は従来の直円柱波力に対する知見の範囲内にあることがわかる。

(2) 一方向流れの作用実験

本水槽は強力なポンプにより強い一方向流を発生できる。本実験では流速が最大で90cm/sの実験ケースを得ることができた。図-5は抗力係数とRe数の関係を示したものであり、図中の曲線は既往の直円柱に対する結果である⁸⁾。本実験に用いた模型樹木は複雑な形状を有するものの、抗力係数の値は従来の直円柱に対する知見に近い値が得られた。

(3) 段波の作用実験

水槽内の流れをせき止めた板を瞬間的に引き上げるにより、段波を発生させ模型樹木に作用させた。図-6は作用モーメントと樹木設置地点での流速の時間変化を示したものである。この図では水槽床から3cm上方での流速測定結果を示した。樹木は急激な流体力の作用により撓んで振動することが観察された。測定されたモーメントも流速波形とは一部逆位相の時間波形を示した。

4. 樹木モデルに作用する流体力についての数値解析

(1) 数値解析の概要

本実験結果の妥当性を検討するために、実験模型樹木を単純化した多質点系樹木モデルを設定し、実験と同じ諸元を持つ波浪流体力を与えたときの応答変位と内部応力を数値解析した。

図-7は、数値解析の対象とした樹木モデルである。図中の赤番号は節点番号を表し、青番号は部材番号を表す。全節点数は35、全部材数は34である。解析に用いた樹木モデルは、写真-2に示した実験模型樹木の形状を平面2次元に単純化しているが、樹木の全高36cm、幹の基部の直径1.2cm、枝の直径0.2cm等は実験条件と同じである。ただし、幹の直径は頂部で細く(0.3cm)、幹基部に向かうにつれて漸次太く(基部で最大値1.2cm)なるように設定した。樹木の物理特性値はクロマツの木材としての諸量を

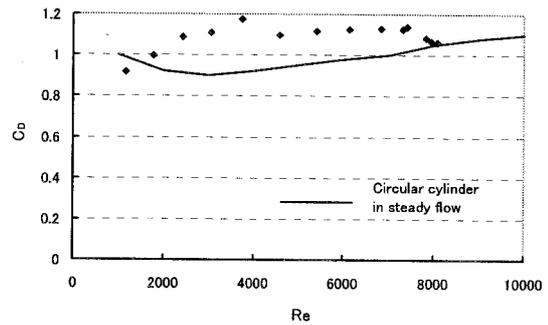


図-5 抗力係数とレイノルズ数の関係
(一方向流)

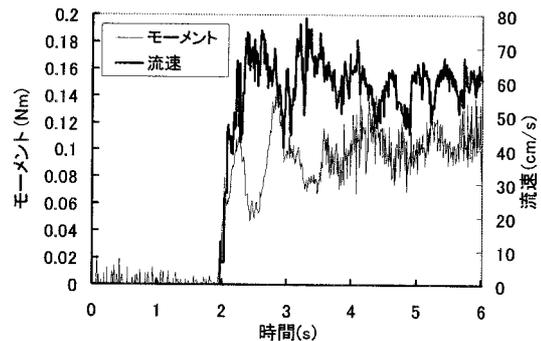


図-6 段波の流速波形と模型樹木に作用するモーメントの関係

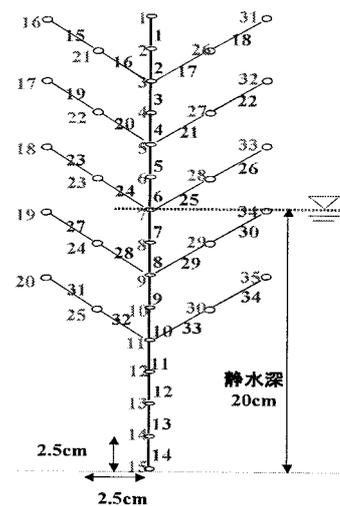


図-7 数値解析に用いた樹木モデル

採用した。すなわち、単位体積重量 570kgf/m^3 ($=5.59\text{KN/m}^3$)、ヤング率 9.8GPa とした。入射波の設定は、本実験条件に準拠して周期 1.5s 、波高 6cm 、水深 20cm を基本条件とし、周期、波高を系統的に変化させた解析を行い、樹木の応答に及ぼす効果を

調べた。

構造物の応答解析はモード合成法によった(例えば石田⁹⁾).外力である波浪は正弦波で与え、水粒子速度と樹木の揺動速度の差の2乗に比例する抗力項は準線形化して全体座標系の運動方程式内に組み込んだ。応答の時間発展計算はニューマークの β 法を用いた。

(2) 計算結果ならびに考察

図-8、図-9は、それぞれ幹部、枝先端部の節点変位の時系列を示したものである。この樹木構造物の固有振動数は67Hzで外力である波の周波数0.67Hzと比して十分に高い。両図の結果から、樹木の挙動は外力である波動による強制振動となっており、鉛直高さが高い位置にある節点ほど変位が大きい。このことは枝部にあっても同様であるが、低い位置にある節点20の変動波形は、他の節点と比べ位相が少し遅れることが分かる。

図-10は、幹部節点の最大水平変位の鉛直分布を入射波高をパラメータとして示したものである。幹先端に行くほど水平変位が大きくなり、本計算条件の範囲内では最大で0.02cm程度の変位となった。

図-11は幹部節点の最大曲げ応力 σ の鉛直分布を示したものである。曲げ応力 σ は、曲げモーメント M から次式を使って計算される。

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad \dots (3)$$

ここに、 y は中心軸上からの距離、 I は断面2次モーメントである。分布荷重を受ける片持ち梁では底面で最大の曲げモーメントを生じるが、本解析では幹直径を基部に近づくにつれ太く設定しているの、(3)式の関係にある最大曲げ応力は底面からの高さ7.5cm程度で最大値を示すことになる。また、底面からの高さ22.5cm、17.5cmの節点で隣接する25cm、20cm、15cmの節点における応力値より小さくなっているのは、これらの節点が枝部材を持たないために、枝部材から伝達される応力が無いためと考えられる。

(3) 実験結果と解析結果の比較

図-12は模型樹木の直下で計測された曲げモーメントの実測時系列と樹木模型の最下点に近い部材番号④で計算された曲げモーメントの時系列を比較したものである。

図-11に示した最大曲げ応力値の結果から曲げモ

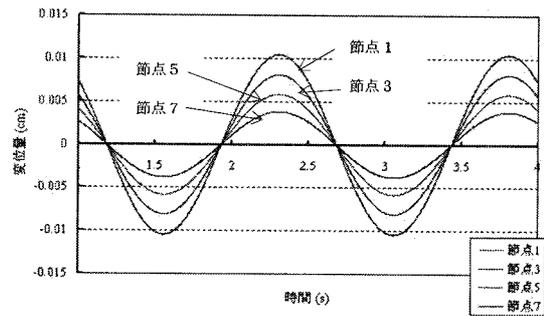


図-8 幹部節点の変動の時系列

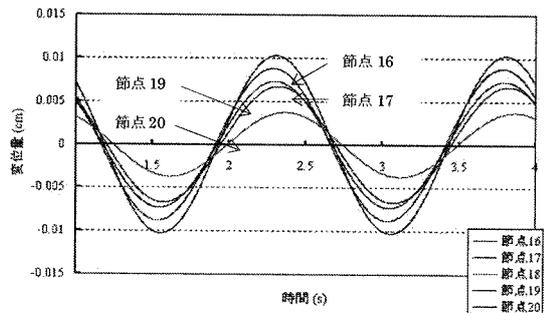


図-9 枝部節点の変動の時系列

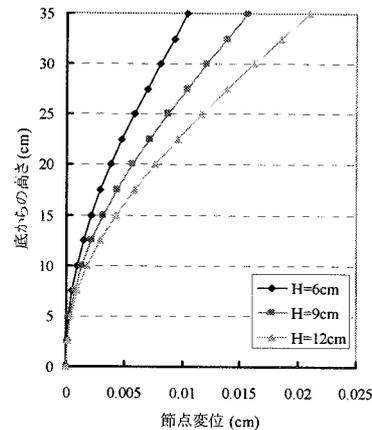


図-10 幹節点の最大水平変位

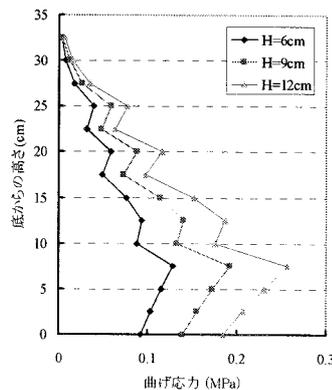


図-11 幹節点の最大曲げ応力

ーメントを逆算すると $M=0.0169\text{Nm}$ となる。一方、図-12 上段の実験から得られた曲げモーメントの最大値は $M=0.028\text{Nm}$ 程度(図中赤丸印)であるが、これは図-2 で示したように、本実験装置では樹木底部から 9.7cm 下方に 3 分力計が設置されており、モーメント算出時のアーム長さが長くなっている。これを水槽底面まわりの樹木模型に作用するモーメントに換算すると、 $M=0.0132\text{Nm}$ が得られ、前述の解析結果 $M=0.0169\text{Nm}$ と近い値になる。解析の樹木モデルは平面 2 次元であり実験樹木モデルと形状も少し異なることを考えると、両者は良く一致していると考えられ、実験結果の妥当性が裏付けられた。

5. まとめ

本研究では、実樹木の測量結果に基づいて製作した樹木模型を用いて流体力の測定を行い、抗力係数、慣性係数の特性を明らかにした。複雑な形状を有する樹木の流体力係数の結果は、ばらつきは有するものの既往の単円柱に対するものに近い結果となることが確認された。

実験で用いた樹木模型を単純化した樹木モデルについて多質点系構造物として波動外力に対する応答計算を実施した。樹木を構成する枝や幹の各節点の変位や応力の特性を考察した。実験で得られた最大曲げモーメントの値は、解析結果から逆算される曲げモーメントの最大値と良く一致し、本実験結果が良い精度で得られていることが認められた。

今回は 1 種類の樹木構造模型に対して流体力測定を実施したが、今後はさまざまな構造の樹木模型に対しても同様な流体力測定を実施したい。また、模型全体にかかる流体力測定を測定するだけでなく、枝と幹の接合部に作用する曲げモーメントの測定も行い、津波外力による幹や枝の折損耐力についても検討したい。

最後に実樹木の測量と模型樹木の作成にあたっては、鹿児島大学理工学研究科海岸工学講座所属の元学生である内園憲仁君、北山剛史君の協力を得たことを付記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 浅野敏之・藤宮祐介・伊藤暖：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, 2007.
- 2) 柳澤英明・越村俊一・宮城豊彦・今村文彦：2004 年

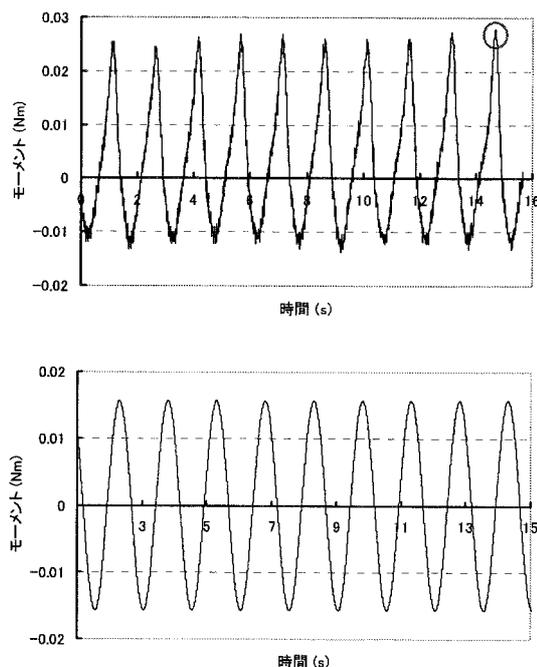


図-12 曲げモーメントの時系列に関する実験結果(上段)と計算結果(下段)の比較
($H=6\text{cm}$, $T=1.5\text{s}$, $d=20\text{cm}$)

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と津波減衰効果，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 286-290, 2008.

- 3) 今井健太郎：津波による沿岸林内樹木の被害に関する統計モデルの開発，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 291-295, 2008.
- 4) 瀬戸口修造・浅野敏之：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, 2009.
- 5) 大隅眞一：森林計測学講義，養賢堂，p. 287, 2001.
- 6) 林建二郎：分力計を用いた水理構造物に作用する衝撃的流体力評価，応用力学論文集，Vol. 10, pp. 851-858, 2009.
- 7) Sarpkaya, T. : Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, Trans. of ASME, March, pp. 32-37, 1975.
- 8) 土木学会：水理公式集一昭和 46 年改訂版一，pp. 45-47, 616p, 1971
- 9) 石田啓：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.