

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

NUMERICAL SIMULATION ON TSUNAMI ATTENUATION PROPAGATING OVER A COASTAL FOREST

瀬戸口修造¹・浅野敏之²

Shuzo SETOGUCHI, Toshiyuki ASANO

¹ 学生会員 工修 鹿児島大学大学院研究生 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)

² 正会員 工博 鹿児島大学大学院教授 理工学研究科海洋土木工学専攻 (同上)

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 investigates the morphologic properties of coastal trees which will act as hydrodynamic resistance against tsunamis. Then, a numerical simulation based on the CADMAS-SURF model has been conducted. Tsunami attenuations due to the resistance by coastal forests are well reproduced by the present numerical work. Comparisons between with and without coastal forest model have revealed that the phases of water surface fluctuation and horizontal velocity proceed when the coastal forest model exists.

Key Words: Tsunamis, coastal forests, hydrodynamic resistance, attenuation, tree morphology

1. 研究の目的

マツ林・マングローブ林などの海岸林は、平常時には自然景観や周辺環境に便益を与える一方、稀に起こる大津波の来襲時にはエネルギーを減殺させて背後地を守るため、環境・防災に両立する魅力的な津波防災対策として注目を集めている。海岸林の津波減衰能力は樹木群の形状抵抗を源泉とするが、樹木群の葉・枝・幹部から構成される複雑な形状によって、津波流体運動がどのように変形し減衰していくかは、十分に明らかにされていない。浅野ら¹⁾は、海岸林の幹・枝・葉全体の流体抵抗を考慮した津波波高減衰モデルを提案し、波高減衰係数の解析解を示した。そこでは、樹冠部は多孔性構造物として取り扱ったが、樹木群の形状特性を十分正確には取込んだものではなかった。また波高減衰係数の解析的な表示を得るため線形波動理論を用いたが、非線形性・分散性・碎波など津波による自由水面運動を表現するには単純すぎるものであった。

本研究では、まず海岸林の津波に対する流体抵抗を本数値解析にモデル化して組込むことを目的として、樹木群の形状特性の現地調査を行った。次いで海岸林を樹冠部と幹枝部の2層から成る透過性構造物としてモデル化し、この上を遡上する津波の減衰状況を数値シミュレーションによって検討した。

2. 樹木群の形状抵抗に関する現地調査

(1) 現地調査の概要

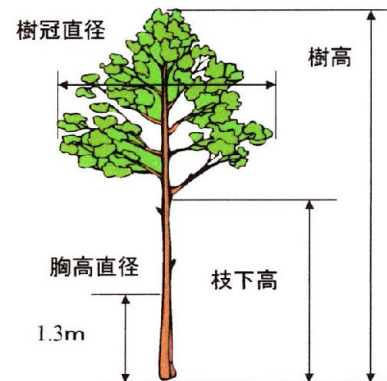


図-1 樹木形状の調査項目

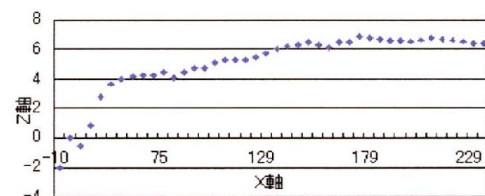


図-2 現地の海岸林前面部の地形形状

本数値シミュレーションにおける海岸林のモデル化にあたって、幹・枝・葉など樹木基部・樹冠部がもたらす津波に対する形状抵抗評価するには枝下高や樹幹直径などのパラメータが必要なので、現地調査をおこなった。

現地観測は、鹿児島県大崎町「くにの松原」において2007年10月30日～11月2日および2008年12月

11日に実施した²⁾。このマツ林は志布志湾に面し肝属川と菱田川の間に長さ12.9km、平均林帯幅550mにわたって分布している。主林木はクロマツで、下層木はほとんど無い。測定地点は「くいの松原キャンプ場」地先のマツ林で、立木密度の異なる計33点の標本地（プロット）を選定した。測定項目は、図-1に示すように、個々の単木については胸高幹直径・樹高・（生・枯）枝下高・樹冠直径・幹傾斜角・枝の分岐角であり、林分については立木密度である。胸高直径については直径巻き尺、樹高・枝下高はパーテックス等の測高器や測棒によって計測した。立木密度は10mあるいは5m四方のプロットを設定して樹木本数をカウントするとともに、レラスコープを用いたプロットレスサンプリング³⁾も援用した。

(2) 樹木形状の汀線からの距離に伴う変化

図-2は汀線からマツ林までの砂丘部の地形を示したものである。横軸 x の原点は汀線に相当し、右側端 $x=240\text{m}$ が海岸林の海側端となる。

図-3は5m四方のプロット内の平均樹高と幹の傾斜角を求め、海岸林海側端からの距離 x^* による変化を調べたものである。海岸林は海からの風を受け、その影響は海側端に近いほど強い。そのため、 $x^*=60\text{m}$ 程度までは胸高直径も小さく幹も陸方向に傾斜することがわかる。

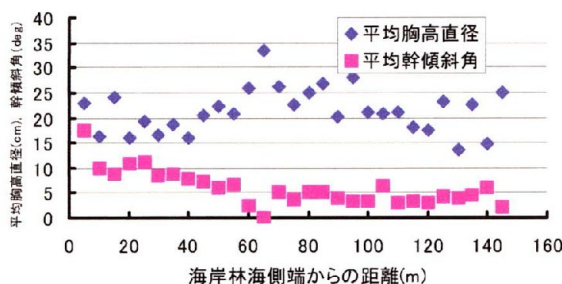


図-3 平均樹高・平均枝下高の分布

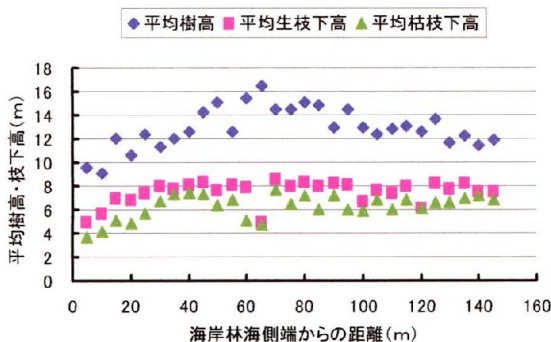


図-4 胸高直径・幹傾斜角の分布

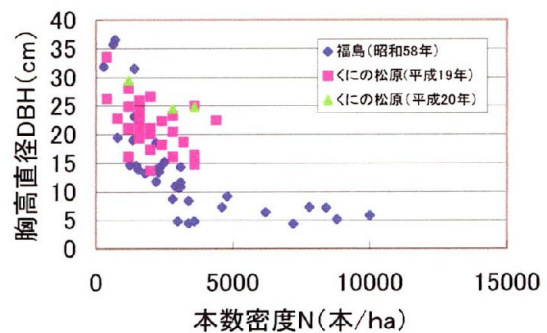


図-5 立木密度と胸高直径の関係

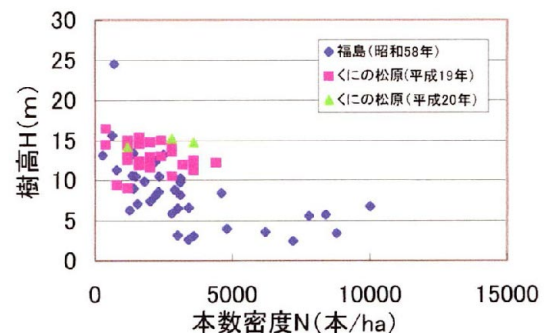


図-6 立木密度と樹高の関係

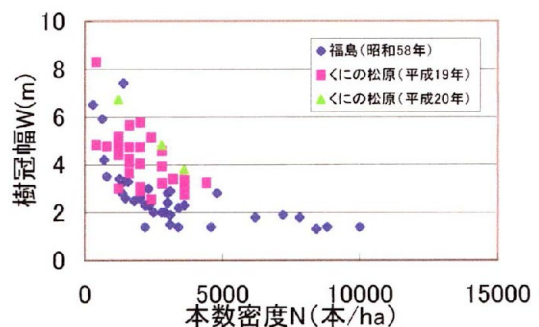


図-7 立木密度と樹冠幅の関係

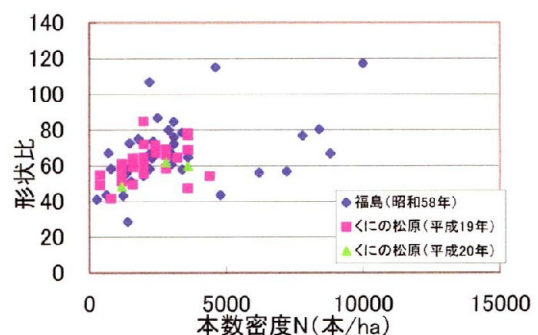


図-8 立木密度と形状比の関係

図-4は樹高と平均枝下高について、海岸林海側端からの距離を横軸にとって示したものである。ここで枝下高は葉の付いた最下部の枝の高さ（生枝下高）と枯れた最下部の枝の高さ（枯枝下高）の両者を測定した。樹高や枝下高に関しても、 x^* が海側端から40～60m程度までは、海からの強風や潮害のため成長が劣ることがわかる。

(3) 樹木形状と立木密度との関係

林分内の樹木群は、林冠がいったん閉鎖され周辺の樹木との間の日照の争奪競争が開始されると、樹木の生長は立木密度 N に支配されるようになる。以下では、「くにの松原」における2007年、2008年の松元ら²⁾の観測結果と、渡辺ら⁴⁾がいわき市・富岡町・原町のクロマツ林の観測資料を用いて、樹木形状と立木密度の関係を検討した結果を示す。

図-5は立木密度 N と胸高直径 D_{BH} の関係を示したものである。 N と D_{BH} は逆相関の関係にあることがわかる。幹の太い樹木は樹木間競争に勝ち残った樹であり、その段階の林分では立木密度は小さくなる。

図-6は立木密度 N と樹高 H の、図-7は立木密度 N と樹冠幅 W の関係を示したものである。立木密度が小さいほど樹高・樹冠幅が大きくなる。ここには示していないが樹冠高さ ($H_c = H - H_B$) と N の関係も同様となる。

図-8は形状比（樹高と胸高直径の比）と N の関係を示したもので、この場合は N に係わらずほぼ一定となった。

樹冠幅や樹冠長（樹高－枝下高）が大きいほど、樹冠部の津波に対する流体抵抗が増加することを意味する。また形状比が小さいほど太くがっしりした樹形となり、津波の流体抵抗を受けたときに倒伏・折損をせず、流体抵抗として機能することを示している。

3. 数値解析の概要

前節で見たように、海岸林の樹高や幹直径などの形状特性は、海からの風や塩分濃度などの環境条件の影響

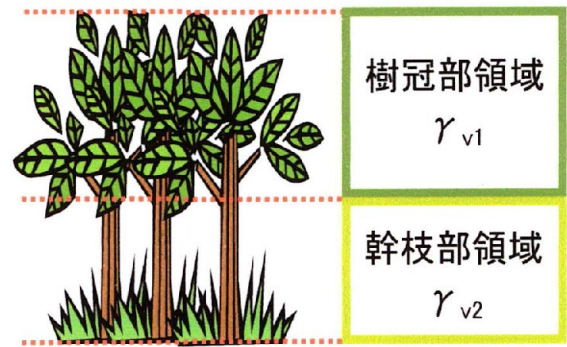


図-9 海岸林のモデル化

を受け、汀線からの距離によって変化するとともに、隣接樹木群との日照の競合関係を通じて立木密度の疎密によっても大きな影響を受ける。海岸林の津波減衰能力を評価するためには、こうした海岸林の形状特性の空間分布についても精密に数値計算に反映させることが必要であるが、現時点では観測場所、環境条件によらない普遍的な形でそれらの特性をまとめ切れていない。

本研究では複雑な自由表面の形状を解析できるCADMAS-SURF^{5),6)}の本課題への適用を検討するが、現段階ではまず水理現象の正確な再現を重視し、海岸林の形状の取込みは概略的に導入することにした。

海岸林の透過性構造物としてのモデル化にあたっては、図-9に示すように樹冠部領域と幹枝部領域の2層に分割し、それぞれに異なる空隙率 γ_v ($\gamma_v = 1 - \delta_v$; δ_v は樹木占有体積率) を与えた。 δ_v は幹・枝・葉で構成され、これらは前節で示したように、海岸林前縁からの距離の関数であり、立木密度とも密接に関係する。ここでは、空隙率 γ_v を空間的に一定とし（すなわち樹木占有体積率 δ_v を一定とし）、原田・今村⁷⁾の現地調査結果に基づき、樹冠部領域 $\gamma_{v1} = 0.35$ 、また幹枝部領域 $\gamma_{v2} = 0.95$ として与えた。

数値解析の基礎方程式は、Navier-Stokes 式と連続式をポーラスモデルに基づいて拡張したもので⁸⁾、自由水面解析モデルはVOF法によった。解析領域は図-10に示すとおりであり、マングローブ林を想定して静水

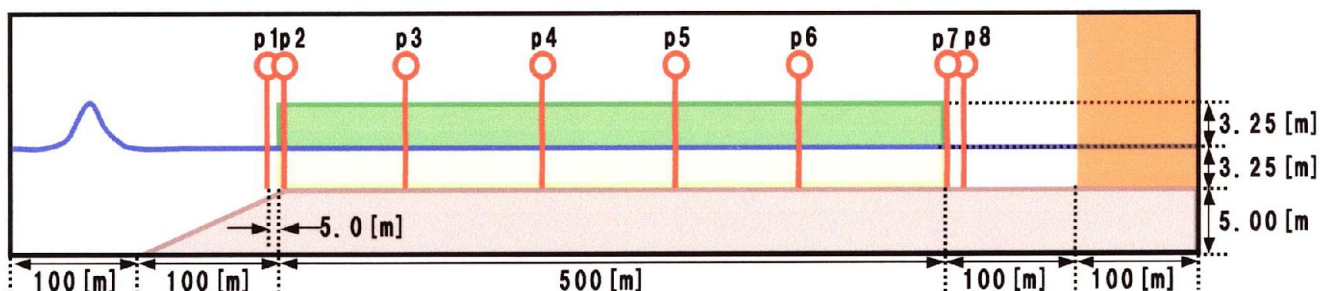


図-10 数値計算の設定条件

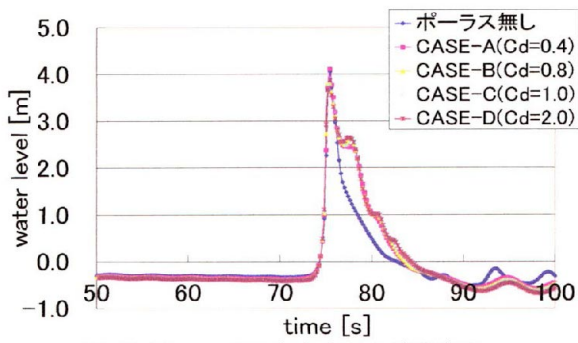


図-11(a) p1 での自由水面の時間変化

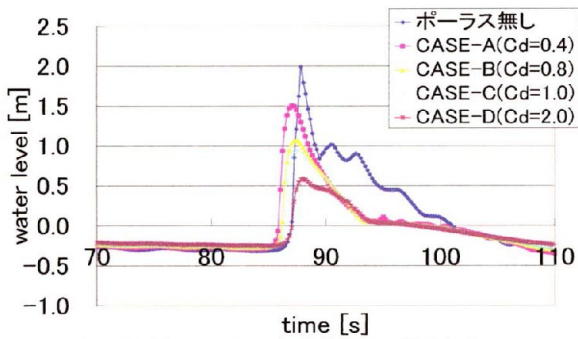


図-11(b) p3 での自由水面の時間変化

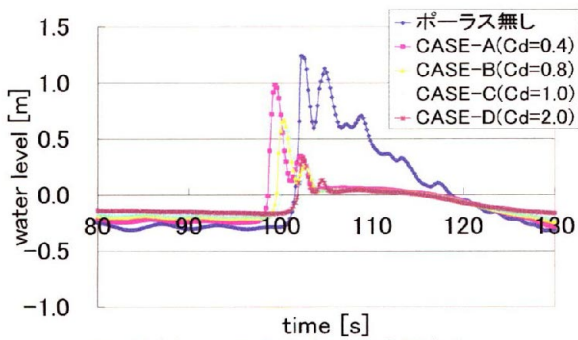


図-11(c) p4 の自由水面の時間変化

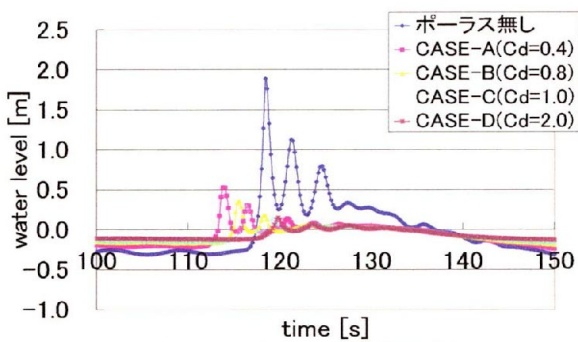


図-11(d) p5 の自由水面の時間変化

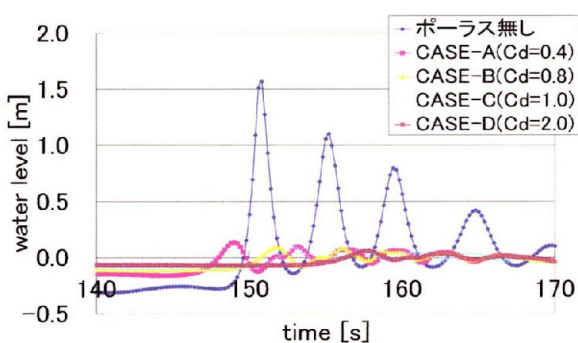


図-11(e) p8 の自由水面の時間変化

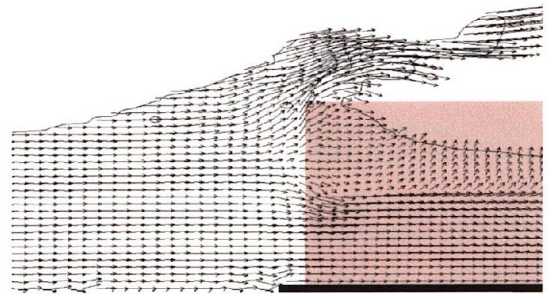


図-12(a) $t=76.2s$ での CASE-D のポーラス前面での様子

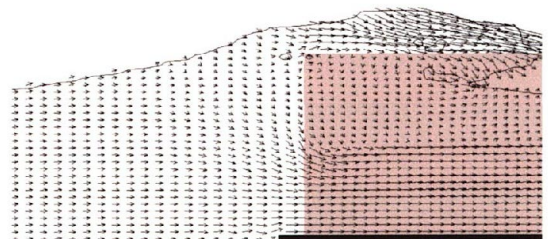


図-12(b) $t=76.8s$ での CASE-D のポーラス前面での様子

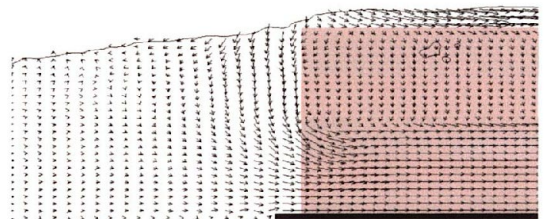


図-12(c) $t=77.4s$ での CASE-D のポーラス前面での様子

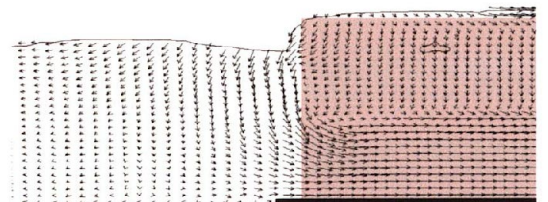


図-12(d) $t=78.0s$ での CASE-D のポーラス前面での様子

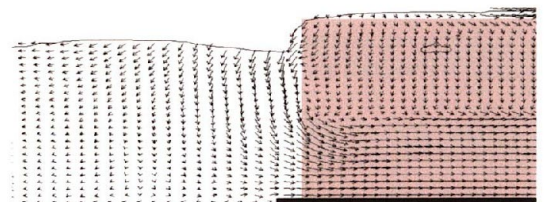


図-12(e) $t=78.6s$ での CASE-D のポーラス前面での様子

深を樹冠部と幹枝部との境界高さに設定した。入射する津波の波高、周期はそれぞれ $H=4.0\text{m}$ 、 $T=60.0\text{s}$ とした。セルの大きさは Δz を 0.25m とし、 Δx は沖波一様水深、斜面部、岸側一様水深部に対してそれぞれ 0.45m 、 0.40m 、 0.30m と設定した。計算領域右端は反射波吸収のために 100m 区間のエネルギー減衰帯を設定した。

ポーラスモデルは、右端から 200m 地点から 700m 地点までの 500m にわたって設定し、高さは樹冠部領域 3.25m 、枝幹部領域 3.25m とした。本研究では海岸林による津波減衰を評価するために、ポーラスモデルが無い時とある時の比較計算を行った。

モニタリングポイント p1～p8 は、左端からそれぞれ、 195m 、 200m 、 300m 、 400m 、 500m 、 600m 、 700m 、 705m 地点に設定し、それぞれの地点での自由水面の変化、エネルギー・フラックスを比較した。なお流速においては、モニタリングポイントから水平方向に $+5\text{m}$ 、鉛直方向に平均した速度を用いた。

いくつかの予備計算の結果、津波減衰には樹木の抗力係数 C_d が重要なパラメータとなることが分かったの

で、ポーラスモデルがある場合は、樹冠部領域・幹枝部領域ともに抗力係数 $C_d=0.4$ (これを CASE-A とする)、 $C_d=0.8$ (CASE-B)、 $C_d=1.0$ (CASE-C)、 $C_d=2.0$ (CASE-D) の 4 通りを設定し、これにポーラスモデルが無い場合を加えて、計 5 ケースの計算結果を比較し、海岸林の津波減衰に与える効果を調べた。

4. 結果ならびに考察

図-11(a)～(e)は、水位変動 η の時間波形を図-10に示した各モニタリングポイントごとに示したもので図-12は、樹木抗力係数を CASE-D の条件で計算したときの、海岸林前縁部に津波が来襲した時点以降の海岸林内の流速ベクトルと水位変動を示したものである。図中の時間 t は、計算領域沖側端から津波造波を開始してから経過時間である。

図-11(a)は、海岸林前縁部に位置する p1 地点の水位変動を示したものである。海岸林がある場合 (CASE-A～D) と無い場合 (「ポーラス無し」) ではピーク水位こ

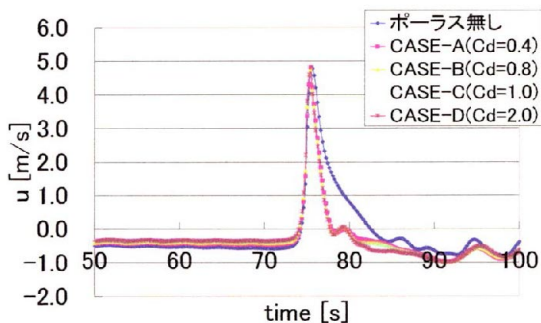


図-13(a) p1 での水平平均流速の時間変化

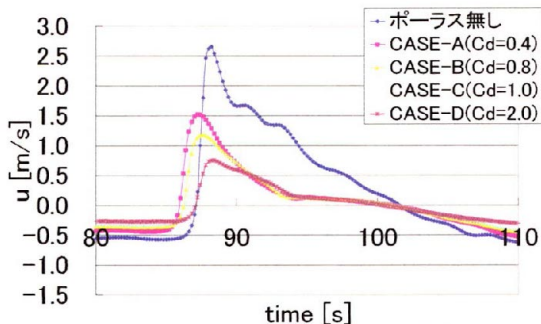


図-13(b) p3 での水平平均流速の時間変化

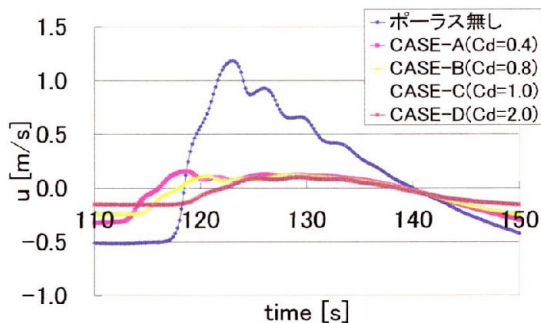


図-13(c) p5 での水平平均流速の時間変化

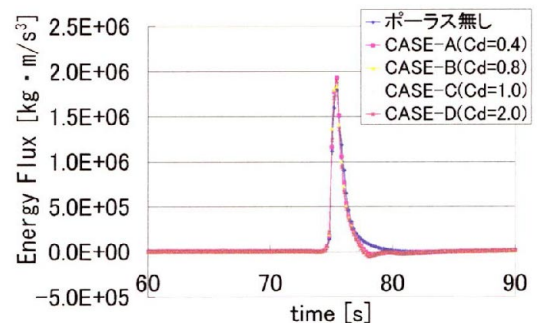


図-14(a) p1 でのエネルギー・フラックスの時間変化

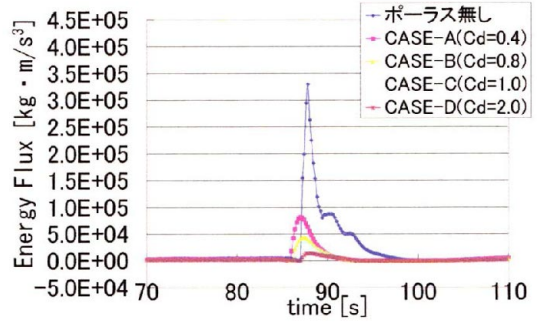


図-14(b) p3 でのエネルギー・フラックスの時間変化

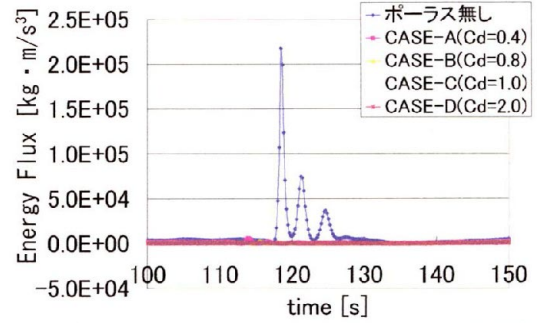


図-14(c) p5 でのエネルギー・フラックスの時間変化

水位以降、急速に水位が低下するのに対し、有る場合はピーク水位以降、 $\eta=+2.5\text{m}$ 付近で一旦停滞し、その後なだらかに減少することがわかる。これは図-12(b)～(e)の水位変動に示されるように、海岸林がある場合には海岸林の樹冠部の抵抗により水塊が樹冠部領域内に留まっているためと考えられる。

図-11(b)～(e)から、津波が岸側に伝搬していく過程で水位がどのように減衰していくかが読み取れる。当然のことであるが、樹木抵抗係数 C_d が大きいほうが減衰が大きい。最も岸側の図-11(e)の p8 地点の結果では、海岸林の流体抵抗によって CASE-A～D とともに津波がほぼ減衰していることが読み取れる。同時に波の分散性によって津波波形は最終的に5つ程度のソリトンに分裂することも示されている。

また、図-11(b)～(e)を通じて、海岸林を模したポーラスモデルを導入した CASE-A～D では、水位のピークが海岸林が無い場合より先行することがわかる。図-12(特に図(c), (d))の流速ベクトルを見ると、津波による流体塊の運動は、海岸林内の下層(幹枝部)に潜り込み、そこでの水平流速が大きくなることがわかる。一方、樹冠部では流速の水平成分はほとんどなく、それ以前に樹冠部を乗り越えた水塊が樹冠部内を鉛直下方に流下する様子が認められる。したがって、図-11の海岸林を考慮したケースのピーク水位が海岸林が無い場合より先行するのは、この流体塊が空隙率の大きな下層部に流入していくことによると考えられる。

図-13は鉛直平均した水平流速 u について同様に津波の伝搬していく過程での変化を示したものであり、図-11に示した水位変動と同様に、岸へ伝搬していく過程の流速の減衰と、ポーラスモデルを導入することによって流速のピーク位相が海岸林が無い場合より先行することが得られている。海岸林がある場合の鉛直平均した水平流速の位相は下層部の流速の増大に支配される。よって後者のピーク位相の先行は、前述のように津波による流体塊が空隙率の大きな下層部に流入するためと考えられる。

最後に、次式で示す津波のエネルギーフラックス E_f の伝搬に伴う変化を検討した。

$$E_f = \int_a^{\eta} (P + \rho g z + \rho(u^2 + w^2)/2) u \gamma_v dz \quad \dots(1)$$

ここで P は全水圧、 z は平均水位をゼロとして上向きを正とした座標、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。図-14はエネルギーフラックス E_f の津波伝搬に伴う変化を示したもので、図-11、図-13と同様の特性が

認められるが、 E_f はおよそ u の3乗に比例するため、その伝搬に伴う減衰は η や u より著しくなることがわかる。

5. 結論

海岸林の津波に対する形状抵抗に密接に関与する樹高・胸高直径・樹冠幅などの特性を現地観測により明らかにした。次いで海岸林を、樹冠部・幹枝部それぞれに固有の空隙率を有するポーラスモデルで表現し、海岸林上の津波の伝搬過程について数値シミュレーションを行った。

その結果、津波の水位変動・水平流速・エネルギーフラックスの減衰状況について妥当と考えられる解析結果が得られた。また海岸林前面部周辺の流速ベクトルの空間分布から、来襲する津波の水塊が空隙の大きい下層部に潜り込む状況が得られ、海岸林を有する場合の水位や水平流速の時間変動波形が、海岸林が無い場合に比較して位相が先行する結果となった。

今後は、本解析結果の妥当性を実証する実験を行うこと、海岸林の各器官の形状特性をより精密に数値モデルに取り込むことが課題と言える。

最後に、本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究Cによったことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 松元千加子・北山剛史・内園憲仁・浅野敏之(2009)：津波防潮機能に着目した海岸林の樹木形状の現地観測，平成20年度土木学会西部支部学術講演会講演集，II，pp. 361-362.
- 3) 大隅眞一(1987)：森林計測学講義，養賢堂，287p.
- 4) 渡辺次郎ほか(1987)：海岸防災林に関する研究，福島県林試研報，第20号，pp. 105-122.
- 5) 沿岸技術研究センター(2001)：数値波動水路の研究・開発，296p.
- 6) 沿岸技術研究センター(2008)：CADMAS-SURF 実務計算事例集，pp. 114-133，306p.
- 7) 原田賢治・今村文彦(2003)：防潮林による津波減災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.
- 8) 柳山勉・阿部宣行・鹿島遼一(1990)：ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形解析，海岸工学論文集，第37巻，pp. 554-558.