

マングローブ樹形と抗力係数の不確実性を考慮した波浪減衰効果の定量化
 Quantification of Wave Attenuation Effects
 Considering Uncertainties in Mangrove Tree Shape and Drag Coefficient

○長谷川 裕亮・志村 智也・宮下 卓也・Yu-Lin TSAI・馬場 繁幸・森 信人
 ○Yusuke HASEGAWA・Tomoya SHIMURA・Takuya MIYASHITA・
 Yu-Lin Tsai・Shigeyuki BABA・Nobuhito MORI

The use of coastal vegetation as a nature-based solution for disaster mitigation is increasingly important in the context of climate change. Mangroves, in particular, are recognized for their high wave attenuation capacity and their compatibility with natural ecosystems and local industries. Wave attenuation by mangroves is commonly estimated using Morrison-type hydrodynamic force models, and recent studies have improved these models by incorporating mangrove-specific shape characteristics. However, significant uncertainties remain due to individual variability in tree shape and the drag and inertia coefficients embedded in the models. This study aims to quantify wave attenuation by mangroves while explicitly considering these two sources of uncertainty. Variability in mangrove tree shape is evaluated by introducing a probabilistic description of tree structure, allowing individual differences to be systematically assessed. In addition, new hydraulic experiments using full-scale mangroves are conducted to evaluate wave resistance characteristics and associated uncertainties in drag coefficients. The results provide important insights for improving the reliability of mangroves as a sustainable coastal protection measure.

1. はじめに

沿岸防災における植生や砂浜地形の活用は、環境変動への適応策として検討すべき重要な課題である。なかでもマングローブは津波や高波に対する高い防護機能を有する沿岸植生であり、自然環境や地域産業との親和性が高い持続可能な防護策として注目されている。

マングローブによる波高減衰の推定には、慣例的にモリソン型の波抵抗モデルが用いられ、近年ではマングローブ特有の形状特性を考慮した高度化が進められてきた。一方で、形状特性の個体差や、抗力係数・慣性係数の不確実性については、依然として十分な議論がなされていない。

本研究では、これら二種類の不確実性の評価を目的とする。前者については、樹形の鉛直分布を確率的に記述する手法を導入し、形状特性の個体差を評価した。後者については、実スケールのマングローブを用いた新たな水理実験を実施し、波抵抗特性およびその不確実性を評価した。本研究の成果は、マングローブを防護策として活用する際の信頼性評価に資する知見を提供する。

2. 研究手法と結果

(1) 樹形のばらつきを考慮した波高減衰の確率的評価

マングローブに作用する波抵抗力のモデルを示し、樹形の鉛直分布を確率的に記述する手法を導入する。

波エネルギー消散の時間平均 ε は、植生に作用する波抵抗力 F と流速 u との積を水深積分した次式(1)により推定される。

$$\varepsilon = \int F u \, dz \quad (1)$$

波抵抗力 F は、慣例的に次式(2)のモリソン型の抗力項で記述される。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D N u |u| \quad (2)$$

ここで、 ρ :流体密度、 C_D :抗力係数、 Ddz :鉛直変化する植生の投影面積、 N :植生密度である。式(2)を(1)に用いて、微小振幅波理論による波のエネルギー保存を考慮すると、初期波高 H_{rms0} で距離 x 進行した二乗平均平方根波高 H_{rms} の解が、次式(3)で得られる。

$$\frac{H_{rms}}{H_{rms0}} = \frac{1}{1 + \beta x} \quad (3)$$

式(3)中の β は減衰係数と定義され、表式は次式(4)で与えられる。

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\pi}} C_D N \frac{k^2 \int_0^{H_{root}} D(z) \cosh^3 kz dz}{\sinh kh (\sinh 2kh + 2kh)} H_{rms0} \quad (4)$$

樹形の鉛直特性は、式(4)の積分部分に反映されている。個体間の鉛直特性のばらつきを評価するため、個体のサイズを代表する胸高直径(DBH)と呼ばれるパラメータを用いて、形状の規格化を試みた。形状を測定した33個体の規格化の結果を図-1に示す。個体のサイズによらず直線的な傾向がみられ、量的にも一定のまとまりを示した。結果を式(4)、(3)の順に還元し、適当な近似を行うことで、 H_{rms} が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うことが明らかとなった。 μ は、式(3)の推定値であり、 σ は、次式(5)で与えられる標準偏差である。

$$\sigma = \begin{cases} 0.25\mu(1-\mu) & \text{(Way1)} \\ 0.25 \sqrt{\frac{\beta}{\sqrt{N}}} \sqrt{\mu^3(1-\mu)} & \text{(Way2)} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、Way1とWay2は、それぞれ樹林帯内部で樹形の個体差がない場合とある場合を仮定した表記である。結果にもとづき、進行距離—推定波高、推定波高—標準偏差の関係をそれぞれ赤線、青線(実線:Way1, 破線:Way2)で図-2に示した。樹形の個体差がないWay1では、Way2と比較して偏差の蓄積が顕著であると考えられ、図-2に示す結果とも一致する。また、Way1とWay2で標準偏差が最大となる地点は、それぞれ波高が50%, 75%に減衰する地点である。前者はこの最大値を通過するまでに、後者の3倍の距離を要することを示唆している。

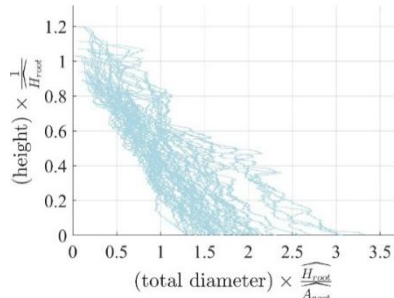


図-1 規格化された樹形の鉛直分布

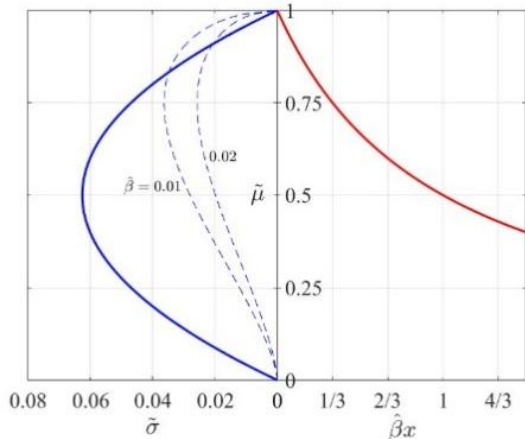


図-2 進行距離、推定波高、標準偏差の関係

(2) 実スケール実験による波抵抗特性の不確実性評価

台湾・国立成功大学(NCKU)水工試験所が所有する長大水路で、実スケールのマングローブを使った水理実験を行った。実験の概要を示す。

水路周辺でマングローブ実個体を採取し、底部に分力計を設置して水路に固定した。また、波高計と流速計を図3のように設置した。造波装置で規則波を発生させ、分力計で波抵抗力を測定した。実験条件は、波高20, 40, 60cm, 周期3.0, 5.0, 7.0s, 水深320, 300, 250cmの組み合わせで行った。図-4は、分力計により得られた波抵抗力の測定結果に、フィルター処理を施した例である。波高と流速についても同様の処理を施し、最小二乗法により係数を決定した。抗力係数の算定値は1.0~2.0付近に集中し、既往の実験結果の実スケールへの適用可能性を示した。

3. おわりに

本研究では、マングローブの形状特性の個体差と、抗力係数・慣性係数の不確実性を評価し、それが波高減衰に与える影響の定量化を行った。形状特性の個体差によって、波高の減衰量は一定の進行距離を境に減少に転じることが明らかとなった。また、実スケールのマングローブを用いた実験により、既往の模型実験により検討されてきた波抵抗特性の、実現象への適用の妥当性が示唆された。

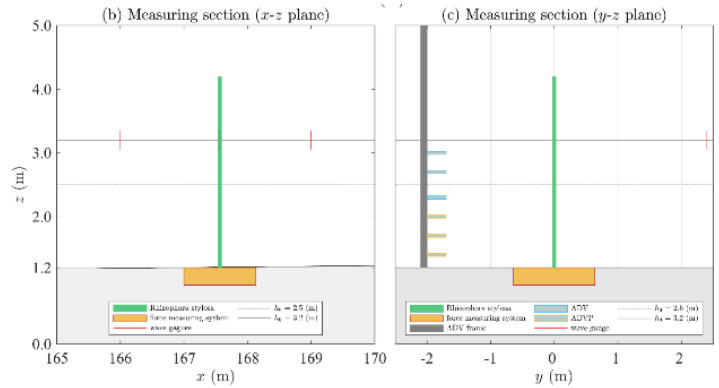


図-3 水路断面の概略図

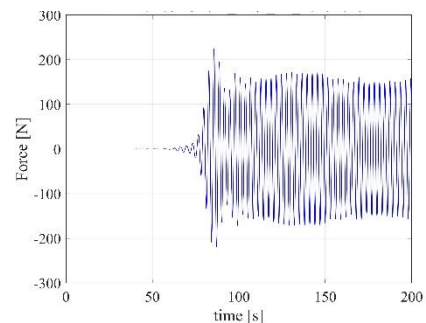


図-4 フィルター処理を施した波抵抗力の測定結果の例 (波高40cm, 周期3s, 水深320cm)