

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

グリーンインフラを用いた気候変動に伴う沿岸災害の減災評価手法の開発
(2-1712)

平成29年度～令和元年度

Development of Coastal Disaster Reduction Assessment
Method by Green Infrastructure considering Climate Change

〈研究代表機関〉

国立大学法人京都大学

〈研究分担機関〉

日本電気株式会社

国立環境研究所

東北学院大学

茨城大学

海上・港湾・航空技術研究所

〈研究協力機関〉

金沢大学

国際マングローブ生態系協会

コンサベーション・インターナショナル・ジャパン

令和2年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	14
II-1 温暖化による台風増加と沿岸ハザード評価 （国立大学法人京都大学） 要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 HPC技術適用によるシミュレーションモデルの高度化 （日本電気株式会社） 要旨	29
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 マングローブ分布と機能評価に関する研究 （国立研究開発法人国立環境研究所） 要旨	48
1. はじめに	

2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-4 マングローブ波浪低減効果の把握 70

(学校法人東北学院大学)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況

引用文献

II-5 グリーンインフラによる減災効果 88

(国立大学法人茨城大学)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況

引用文献

II-6 ライフサイクルを考慮した最適な組合せ 96

(国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果

6. 国際共同研究等の状況

7. 研究成果の発表状況

引用文献

III. 英文Abstract

..... 113

I. 成果の概要

課題名 2-1712 グリーンインフラを用いた気候変動に伴う沿岸災害の減災評価手法の開発
 課題代表者名 森 信人 (国立大学法人京都大学防災研究所沿岸災害教授)
 研究実施期間 平成29～令和元年度
 研究経費(累計額) 116,206千円
 (平成29年度:39,319千円、平成30年度37,569千円、令和元年度:39,318千円)

本研究のキーワード 沿岸災害、マングローブ、グリーンインフラ、Eco-DRR、地球温暖化、気候変動、適応策

研究体制

- (1) 温暖化による台風増加と沿岸ハザード評価(国立大学法人京都大学)
- (2) HPC技術適用によるシミュレーションモデルの高度化(日本電気株式会社)
- (3) マングローブ分布と機能評価に関する研究(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (4) マングローブ波浪低減効果の把握(学校法人東北学院大学)
- (5) グリーンインフラによる減災効果(国立大学法人茨城大学)
- (6) ライフサイクルを考慮した最適な組合せ(国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所)

研究協力機関

国立大学法人金沢大学
 琉球大学熱帯生物圏研究センター
 国際マングローブ生態系協会
 コンサベーション・インターナショナル・ジャパン

1. はじめに(研究背景等)

2005年ハリケーン・カトリーナ、2013年台風Haiyanなど、強い熱帯低気圧による沿岸災害の事例が多く記録されている。北大西洋では、衛星観測が開始した1970年代以降で見ると、強い熱帯低気圧の頻度と強度が増大していると評価されている。残念ながら、長期的な観測値の不足により、個々の海域における熱帯低気圧の長期的な変化傾向は未だよく理解でされてない。一方、地球温暖化に係る研究の進展により、全球大気モデル(GCM)による21世紀末の将来変化については、ここ十年で理解が進んでいる。全球での熱帯低気圧の発生頻度は減少もしくは変化なしという可能性が高く、熱帯低気圧の風速や気圧は全球平均的には強まる可能性が高いと評価されている。2013年にフィリピンを襲った台風30号Haiyanのような900hPaを切る強い台風による高潮・高波による沿岸部の被害が報告されており、IPCC第5次評価報告書(AR5)WGIIにおいても、熱帯低気圧の将来変化が生じた場合の災害リスクの増大の可能性が指摘されている。特に、高潮と高波の21世紀末における増大は「可能性が非常に高い」(very likely)とされており、近未来における変化も「可能性が高い」(likely)とまとめられている。ただし、特定地域における高潮・高波の変化についての予測の不確実性は大きく、特に高潮の将来変化予測の確信度は低いことが明記されている。

マングローブは、二酸化炭素固定効果が見込めるため、緩和策としての効果が認められてきた。一方で、津波や波浪の沿岸ハザードの軽減効果としてのグリーンインフラストラクチャ(グリーンインフラ)としての役割も大きい。2004年のインド洋津波では、マングローブによる減災効果が観測され、沿岸災害の軽減策として「グリーンインフラ」の価値が注目され、Eco-Disaster Risk Reduction(Eco-DRR)として導入が行われてきた。しかし、その植林範囲・保全は経験則によるところが多く、多様なハ

ザード・地域性に応じた軽減効果、ライフサイクルやトータルコスト等に関し、科学的・定量的な知見が十分ではない。例えば、ある種類のハザードのどの程度の強さに対して、マングローブの減災効果がどの程度あるのか、また植林後の機能の時系列変化等の物理的・生物学的評価、さらにはレイアウト等の最適化についての知見は多くない。

2. 研究開発目的

本研究では、台風による沿岸災害軽減のためのグリーンインフラの導入効果を対象に、台風のダウンスケールからハザード評価とマングローブによる減災効果の統合的モデル開発を行い、これに加えてグリーンインフラを用いた適応策の評価手法を体系化することを研究開発の目的とする。具体的な研究要素は、サブテーマを組み合わせ、以下の3項目に大別される。

- (1) コア技術開発：温暖化による台風増加と沿岸ハザード評価 (サブテーマ1、2)
- (2) 要素技術：マングローブ防災効果の定量化 (サブテーマ3、4)
- (3) 社会技術：グリーンインフラとグレーインフラの最適な組み合わせ (サブテーマ5、6)

項目(1)のサブテーマ1、2では、気候変動の影響を考慮して台風発達から沿岸数kmまでの高潮・高波ハザードを評価可能な大気・海洋・波浪結合モデルを開発する。さらに極浅海におけるマングローブの効果を評価可能とする高解像度波動モデルを開発する。2つのモデルを統合し、沖合から氾濫まで対応可能なハザード・適応策評価のモデルを構築する。

項目(2)のサブテーマ3、4では、マングローブに関し、数値モデルに必要とされる樹形等の物理的特性を把握し、項目(1)に必要な物理的パラメタリゼーションを行う。更に、フィリピンにおける植生とライフサイクルについて取り纏める。また、気候変動に伴う環境変化が生育へ与える影響も検証する。

項目(3)のサブテーマ5、6では、項目(1)(2)の評価をもとに対象エリアを絞込み、グリーンインフラによる減災効果と再起確率の関係をモデル化する。更にグレーインフラを併用した場合のコスト・ベネフィット関係の評価も行う仕組みを構築する。

以上の研究計画に従い、太平洋島嶼国および東南アジアをターゲットに、気候変動に伴う沿岸災害減災のために、沿岸部のグリーンインフラとしてマングローブを取り上げ、その効果を考慮して、台風から高潮・高波の遡上まで考慮した統合モデルの開発を行う。気候変動の台風への影響を気候学的に矛盾無いように取り込み、グリーンインフラの科学的に最適な場所・配置を考慮した適応策の実装手法の構築を行うことを目的とする。

3. 研究開発の方法

- (1) 温暖化による台風増加と沿岸ハザード評価 (国立大学法人京都大学)

IPCC報告書等をもとに、気候変動に伴う台風特性等の将来変化についてとりまとめた。これより、地球温暖化に伴う将来気候条件における台風、高潮、波浪の将来変化についての予測結果を把握するとともに、後述する位相解像型波動モデルに対する初期・側方計算条件の整備をした。これと並行して、大気・海洋(高潮)・波浪結合モデルを構築し、台風による沿岸ハザードの評価モデルを開発し、過去の極端事例を対象に再現実験を実施した。さらに、マングローブの効果を考慮した位相解像型の波動モデルを開発し、大気・海洋・波浪結合モデルを外力として、マングローブの物理的機能を評価可能なモデルの構築を進めた。

- (2) HPC技術適用によるシミュレーションモデルの高度化 (日本電気株式会社)

サブテーマ1で開発される大気・海洋・波浪結合モデルをスーパーコンピュータに実装し、高解像度シミュレーションを実現し、台風による波浪現象について一定時間内にシミュレーションをすることである。このため、スーパーコンピュータとして「地球シミュレータ」を対象とし、本結合モデルの演算特性の解析を行い、効率的なシミュレーションが可能な高解像度結合モデルの開発を進めた。

「地球シミュレータ」が持つVector Processing Unit (VPU) (コアあたり64GFLOPS) を利用するため

にはシミュレーションプログラムをベクトル命令で実行可能な実装を行う必要があり、「地球シミュレータ」において大気モデル、海洋モデル、波浪モデルのそれぞれの演算特性（ベクトル演算率とベクトル長）を解析した。そして、ベクトル演算率とベクトル長を高める実装方式を検討し、効率的にシミュレーションができる結合モデルの開発を進めた。また、大気モデル、海洋モデル、波浪モデルのそれぞれにおける演算特性から各モデルに割り当てるコア数の検討を行い、「地球シミュレータ」において効率的に実行できるモデル開発を進めた。

開発を行ったモデルの再現性を確認するため、2013年にフィリピンに上陸した台風Haiyanを対象とした再現シミュレーションを行った。この再現シミュレーションにおいて台風の物理現象をより忠実に再現するため、利用する計算スキーム・水平解像度および海洋混合層深さによる再現性へのチューニングを行った。台風Haiyanとの観測データに近いシミュレーション結果が得るように感度実験を行った。また、標高・海底地形等を変換し、台風経路を変化させる仮想シミュレーションを実施した。

（3）マングローブ分布と機能評価に関する研究（国立研究開発法人国立環境研究所）

海岸線データには、ESRI標高データ、地形データにはSRTMを使用し分析した。GISを使用し、地形類型マップを作成した。更に、フィリピン全土を対象として、教師無し分類であるKMean法を使った分類を行った。また、フィリピンを含むアジア地域に分布するマングローブ樹種を文献調査により整理した。

栽培実験には、フィリピン沿岸域に植林されている代表的な2樹種である、ヤエヤマヒルギとオヒルギを用いた。気候変動に伴って50-100年後に起こり得る気温上昇シナリオを考慮して、数段階の気温（15-35℃）に制御した人工気象チャンバー内にて温暖化実験を行い、各栽培温度下におけるヤエヤマヒルギとオヒルギの生残・成長速度・形態変化を計測した。さらに、新葉のガス交換とクロロフィル蛍光を測定し、光合成に関わるパラメータを算出した。

野外調査は、気候変動適応策としてのマングローブ植林後の防波機能を推定するモデルに必要なパラメータを得るため、キリバス共和国の植林地において、ヤエヤマヒルギの樹高・幹直径・根張り・支柱根径・支柱根数を計測した。

（4）マングローブ波浪低減効果の把握（学校法人東北学院大学）

マングローブ波浪低減効果の把握するため、1）現地調査による形状特性と成長変化の定式化、2）空中写真判読による森林拡大率の推定、3）水理模型実験および数値シミュレーションモデルによる波浪低減特性の把握、そして4）成長シナリオに対する段波減衰特性の定量評価を行った。項目1では、樹齢の異なるマングローブの支柱根を対象に3Dスキャンを行い、精度検証を行った。さらにスキャンングにより得られた3Dデータを用いて支柱根の投影面積や体積の鉛直分布特性を明らかとした。項目2では、マングローブ林を撮影した複数の年代の異なる空中写真をGISで重ね合わせることでマングローブ林の拡大に関する経時変化を評価した。項目3では、スキャンングしたマングローブ3Dデータから、3Dプリンターを用いて、水理模型実験を行った。また数値モデルとして、非線形長波方程式および、抗力項と慣性力項を考慮したモリソン式を利用し、水理模型実験の再現シミュレーションを行った。項目4では、上記の研究成果に基づいて、マングローブ林の成長シナリオに応じた形状および森林面積の経時変化を推定し、項目3で開発した数値シミュレーションモデルを用いてマングローブ林による段波低減効果の定量評価を行った。

（5）グリーンインフラによる減災効果（国立大学法人茨城大学）

防護シナリオを想定し、グリーンインフラによる減災効果の評価を行った。海面上昇による将来の浸水域増加の予測計算を実施し、防護シナリオとして堤防のみ、堤防とマングローブ林を組み合わせた場合を想定して、浸水域増加を抑える効果を評価するとともに、浸水被害額と防護費用を比較することにより経済評価を行った。

特にフィリピンやベトナム沿岸域を対象に、マングローブ林分布データベースを用いて現在・将来におけるマングローブ林適地を想定するとともに、海面上昇等の浸水影響と、グレーインフラ（堤防）およびグリーンインフラ（マングローブ林）による防護費用データベースを構築し、防護効果と費用便益を解析し、コスト評価の分析枠組みを確立する。

(6) ライフサイクルを考慮した最適な組合せ (国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所)

水理模型実験によりマングローブによる波浪の減衰効果、マングローブに働く波力とその動的応答による波力低減効果を明らかにした。水理模型実験では3D模型を用いた小型実験、および実樹木を用いた実スケール大規模実験を実施した。これらの結果を他サブテーマ1の研究に反映させるとともに、他サブテーマの検討結果からマングローブ海域の一般的な波浪条件やマングローブの成長率、生息範囲の増加率等をもとに、グレイインフラとグリーンインフラのライフサイクルを考慮した最適な組み合わせに関する検討を行った。最適な組み合わせを検討するにあたってはマングローブ林の植生状況ごとの波高減衰効果を反映しつつ、高潮・高波襲来時の海岸線背後域の浸水量を制御する海岸堤防や護岸での越波量を指標として最適な組み合わせを求めるフローチャートを作成した。

4. 結果及び考察

(1) 温暖化による台風増加と沿岸ハザード評価 (国立大学法人京都大学)

気候変動に伴う台風特性の将来変化についてとりまとめ、地球温暖化に伴う将来気候条件における台風、高潮、波浪の将来変化についての予測結果を把握した。台風の将来変化については、CMIP5の代表的なモデルと「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF)」による定常+4Kシナリオに基づく気候変動予測実験結果を解析した。d4PDFをもとに、過去と全球平均気温+4K上昇時の将来気候条件下での台風の中心気圧の将来変化について解析を行った。温暖化に伴い、台風の中心気圧は将来気候条件において顕著に低下する。特に将来変化が顕著となるのは、940hPa以下の強い台風であり、全発生数は減少するものの、920hPa以下の台風の超過確率は1桁増加することがわかった。風速の増加が見込まれる海域は、北半球では北緯20～40度、南半球では同緯度の南インド用西岸域であり、赤道を挟んだ低緯度帯では大きな減少が見込まれる。

大気・海洋・波浪の評価について、相互作用を考慮した結合モデルとして、USGSが開発したCOAWSTをベースとしたモデル開発を行った。COAWSTは、大気がWeather Research and Forecasting (WRF)、海洋(高潮)がRegional Ocean Modeling System (ROMS)、波浪がSimulating WAVes Nearshore (SWAN) modelモデルで構成され、それぞれ自由度が高いコミュニティモデルである。これらを組み合わせ、大気・海洋・波浪の相互作用を考慮できるモデル開発を行った。更に、現在再現計算および将来計算に必要な初期および側方境界条件データ等の整備を行い、再現計算を実施した。台風のHaiyanの再現計算結果では、フィリピンの太平洋側で台風最接近時の最大の有義波高は8mを超え、場所によっては沖合で15mとなっている。一方、太平洋側から西側に入った海域では最大の有義波高は4m以下であり、島による遮蔽効果が大きいため海域ごとの差が顕著であることがわかった。

マングローブの効果を考慮した位相解像型の波動モデルの開発のため、Boussinesq方程式を基礎式とするモデル開発を開始した。モデルでは流速の鉛直分布を考慮可能とし、水位および流速に対応したMorison式をベースとした抵抗力としてマングローブによる減衰力を考慮可能なモデル開発を進めた。マングローブの根張りの鉛直構造を考慮したパラメタリゼーションを行い、これを抵抗力としてBoussinesq方程式に付加し、図4.1.9に示すようにマングローブによる高潮・波浪の減衰効果を考慮できるように改良を開始した。実験を模擬する水深 $h=1.0\text{m}$ の条件における断面2次元場での計算結果である。この計算条件では、マングローブ林により、波高が約25-33%減少し、その減災効果の定量化ができた。

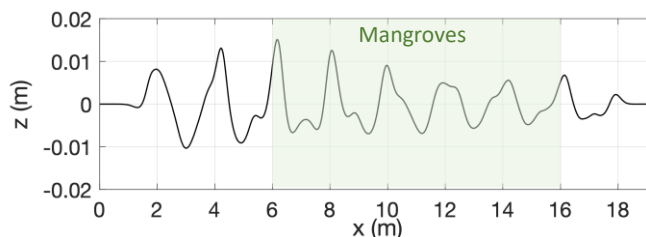


図4.1.9 マングローブ林による波浪減衰モデルの計算例。波浪が左から右に伝わり、樹林帯(緑)で減衰する様子。

(2) HPC技術適用によるシミュレーションモデルの高度化（日本電気株式会社）

大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを「地球シミュレータ」に実装した。「地球シミュレータ」で高速に実行できるように性能解析を実施し、本結合モデルを構成する大気モデル、海洋モデル、波浪モデルのそれぞれのベクトル化率が80%、98%、86%であることを明らかにした。そして、「地球シミュレータ」で高速実行できるように複数の高速化手法を用いて、大気モデル、海洋モデル、波浪モデルのベクトル化率を96%、99%、94%に向上させた。また、並列実行の効率を上げるため、ロードバランスの調整を行った。以上により、3Km/1kmのネスト格子の大気モデルと3km格子の海洋モデルと波浪モデルの結合モデルにおいて、台風Haiyanの5日間シミュレーションを「地球シミュレータ」353ノードを用いて22.74時間で実行できるようになった。

「地球シミュレータ」上で高速に実行できるモデルを用いて、大気モデルの計算スキームや水平解像度、海洋モデルの表層の初期条件および大気モデルと海洋・波浪モデル間の相互作用の影響を調べる感度実験を行った。いくつかの感度実験から、台風の最低気圧への影響は、大気モデルの計算スキームの影響が大きかった。次いで、大気モデルと海洋・波浪モデル間の相互作用の有無の影響が大きかった。大気モデルのみの場合に比べて、大気・海洋・波浪結合モデルの方が最低気圧は高くなり、台風の発達を抑えられることが確認できた。海洋混合層深さに対する感度実験も行った。海洋混合層深さを浅くすることで、混合層深さが深い場合に比べて、台風の発達が抑えられ、最低気圧は高くなることが確認できた。大気モデルの水平解像度の影響も調べた。台風が発達途中(最低気圧が下がる途中)は、水平解像度を高くした方が観測値をより再現していた。しかし、台風が最発達した時点では、最低気圧の値に大きな差は見られなかった。

これらのいくつかの感度実験の結果から、大気・海洋・波浪結合モデルとして最低気圧の再現性が最もよかった計算スキームを選択し、大気モデルの水平解像度は3km/1kmのネスト格子を用いた仮想地形実験を行った。仮想地形実験として、台風Haiyanの再現シミュレーションと同じ大気の初期値・境界値を使用し、標高・海底地形・海陸マスクを南北にずらしたデータを使用してシミュレーションを行い、台風の強度、上陸時間と地形との相関に関して、妥当性を確認した。

本研究で開発した大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを使用することにより、地球温暖化時の非常に強い台風が上陸した際の極端な沿岸災害の評価に必要な高波・高潮の情報を提供できる可能性があることが確認できた。

(3) マングローブ分布と機能評価に関する研究（国立研究開発法人国立環境研究所）

(3)-1 フィリピン沿岸マングローブ生態系分布および沿岸地形

フィリピン沿岸を対象にマングローブ生態系分布および沿岸地形を実施した。図4.3.1に、マングロー



図4.3.1 フィリピン沿岸域マングローブ分布図
左図：フィリピン全土、右図：パナイ島北部の拡大図
緑色のポリゴンがマングローブを示す。

ブ域の抽出結果を示す。海岸線に沿ってマングローブの分布が見られるが、都市や住宅、農耕地への土地利用変化に伴って分布がまばらに離散しているケースが散見された。また、農耕地に転換された後に再度マングローブ植林が行われたと見受けられるケースもあり、そのような場所は区画化されたままで、内陸部に陸封されたように分布している。マングローブ生態系を活用した適応策を講じる際には、このような林分タイプを考慮する必要がある。

フィリピン全土の海岸域を対象に、平均標高と傾斜角をベースに類型化した。作成した類型地図に整備したマングローブ林分布域を載せると、平均標高および傾斜角の低い場所にマングローブ林が分布している傾向が認められた。台風や高潮・高波の襲来といった災害時に被害を受けやすい地形にはマングローブ林が分布しており、生態系を用いた適応策（グリーンインフラ）は効率的であることが窺える。本データは、国立環境研究所生物・生態系環境研究センターから発信されているウェブサイト熱帯・亜熱帯沿岸生態系データベース：Tropical Coastal Ecosystems Portal (TroCEP) URL:<http://www.nies.go.jp/TroCEP/index.html>として公開した。

(3)-2 気候変動に伴う気温上昇がマングローブ植物の生育（グリーンインフラ）に及ぼす影響

15-30℃の栽培温度下では、2種とも栽培実験期間中（51日間）の生残率は100%であった。一方で、35℃では2種ともに実験終了時の生残個体数が0個体となった。また、高温下（35℃）で枯死に至る応答には種差が見られた（図4.3.2）。このことから、ヤエヤマヒルギとオヒルギでは高温に対する耐性が異なっていることが窺える。

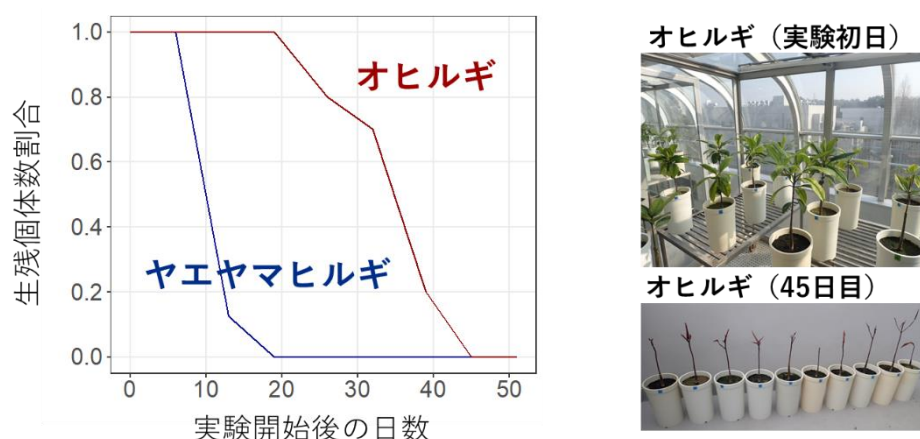


図4.3.2 35℃におけるマングローブ2種（ヤエヤマヒルギ・オヒルギ）の生残曲線

2種の樹高成長速度、直径成長速度、側枝長変化速度の平均値は、15-25℃では栽培温度の上昇に伴って増加していた（図4.3.3）。また25-30℃ではわずかな増加もしくは減少傾向が見られた。光合成にかかわる代謝機能（純光合成機能・光合成系量子収率・呼吸）の気温応答には種差が見られた（詳細成果を参照）。また、高温による代謝機能や形態への影響は、日中と夜間の気温差が重要な規定因子となっていることが明らかとなった。以上の結果は、今後起こり得る温暖化シナリオによっては、将来のマングローブ植物の形態や成長に変化が生じる可能性を示している。

マングローブ植物は元来気温の高い地域に生育する植物であるため、気温上昇の影響を受けにくいという推察がなされることもあるが、本研究により、気候変動に伴う気温上昇が進行した場合、マングローブ植物の生残・成長・形態が変化する可能性があることが明らかとなった。その応答メカニズムには葉の同化・代謝機構が深く関わっている可能性が明らかになり、応答パターンは樹種の持つ特性によって異なることが示唆された。成長速度や形態は、植林後のグリーンインフラとしての沿岸保護機能を左右する重要因子である。本栽培実験におけるヤエヤマヒルギとオヒルギの最適生育温度（成長速度が最大の栽培温度）は25℃付近であった。今後、より詳細な実験が必要であるが、現在の熱帯・亜熱帯の気温が上昇し続けた場合、マングローブ樹林群の持つ沿岸保護機能が低下する可能性がある。

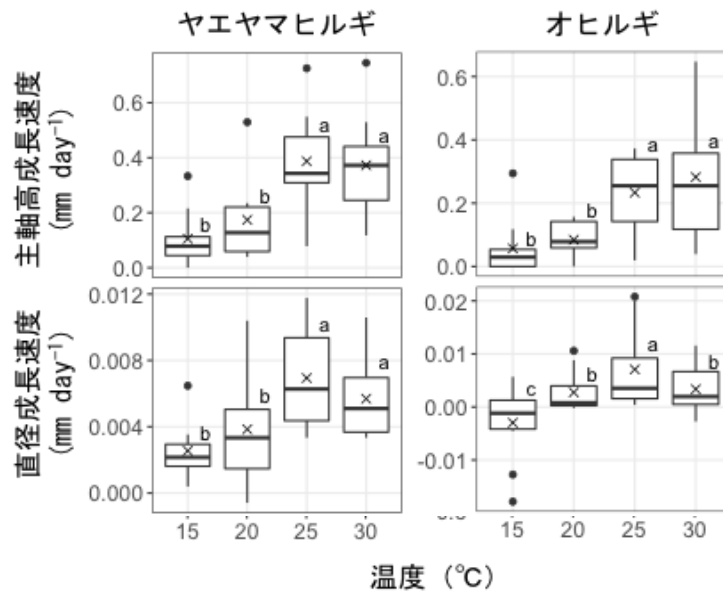


図4.3.3 ヤエヤマヒルギ（左）とオヒルギ（右）の主軸高成長速度、直径成長速度を示す箱ひげ図。図中の×印は平均値を、異なるアルファベットは温度間における統計学的な差があることを示す。

(3)-3 マングローブ植林後の防災機能経時変化

キリバス共和国タラワ環礁にて植林されたヤエヤマヒルギの樹高・幹直径成長速度、根張り幅変化、支柱根直径と支柱根数は、15年間で概ね直線的に増加する傾向が見られた。計測したデータは防波機能評価モデルに使用できるように整理した。本調査より、過去10-15年ほどの期間の植栽情報が分かっている林分があれば、その地域におけるマングローブ植物の形態・成長の経時変化を追うことが可能であることが明らかとなった。このようなパラメータによるマングローブ樹林群の防波機能モデルを使用すれば、より具体的な適応計画につなぐことが出来る。

(4) マングローブ波浪低減効果の把握（学校法人東北学院大学）

ベトナム・カンザー地区において1998年(19年生)と1978年(39年生)に植林されたマングローブを対象として3D計測を行った。3Dスキャン結果と写真の比較から、3Dデータが支柱根位置や細かい節の部分まで良く再現していることがわかった。次に、調査結果から非線形回帰分析に基づいて成長曲線を得られた。3Dデータにより、投影面積や体積の鉛直分布等のマングローブ減災機能評価に重要な特性を得ることができた。

上記の成果に基づき、マングローブ植林後の成長シナリオを検討した。ここではシナリオの一例として、ヤエヤマヒルギを単一植林（林帯幅：100 m植林（初期値）、立木密度：0.66本/m²（一定）、拡大速度：2m/年）を仮定し、15年後と80年経過後のマングローブ林の段波波浪低減効果を算定した。その結果、15年後の減衰率として、水位5%、流体力14%、80年後の減衰率として、水位12%、流体力27%という結果を得ることができた。以上により、シナリオに基づくマングローブ林の波浪低減効果を定量的に示すことが可能となった。

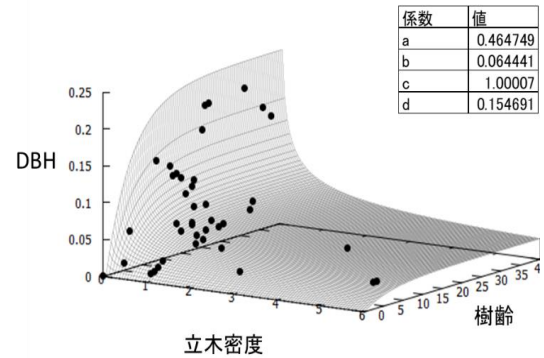


図4.4.2 樹齢に対する胸高直径(DBH)と立木密度の関係

(5) グリーンインフラによる減災効果（国立大学法人茨城大学）

まず全球沿岸域において海面上昇による浸水影響評価を実施した。2100年の各RCP/SSPにおける主要国の潜在的浸水域と国土の浸水率を解析した。潜在的浸水域とは護岸などの海岸・港湾構造物を考慮せずに海水面の変化と標高を比較して算出したものである。2100年のRCP8.5において、潜在的浸水域が最も大きくなるのは中国で約6万km²であり、以下、カナダ、ベトナム、アメリカ、オーストラリアの順となり、フィリピンは12番目に相当する。

海面上昇に伴う浸水の被害額を推定した。フィリピンとベトナムのRCP8.5における各SSPの潜在的浸水面積および影響人口を推定した結果、2100年における潜在的浸水面積はベトナムがフィリピンの約8倍になっている。影響人口はSSP3が最大、SSP1が最小となる。これは、ベトナムは潜在的浸水面積が広く、その中に人口の多いホーチミン、ハイフォン等を含むため、影響人口が大きくなったためである。

グレー・グリーンインフラ費用データベースの構築を行った。堤防費用(1kmあたりの建設費用)は、20カ国455個から各国の施工終了年次の一人当たり実質GDPと比較し、推計式を求めた。同一国内でも立地や建設形式によって多様であるが、総じて国の経済水準が高くなると防護基準も上がり、防護費用も高くなる傾向にある。同様に、20カ国134個の養浜、14カ国89個のマングローブの植林・維持費用をデータベース化し、適応費用の推計式を導出した。これらをもとに、適応効果と費用便益分析を実施した。21世紀末までの堤防とマングローブによる防護の費用効果を分析した。マングローブ分布はTroCEPのデータを用いた。図4.5.6は、フィリピンおよびベトナムの適応費用を示している。Case1は堤防のみ、Case2は堤防とマングローブを組み合わせた場合である。

堤防のみのCase1よりも、堤防とマングローブを組み合わせたCase2の方が適応費用は安価になった。ベトナムではマングローブ林を最大限活用することで、費用便益比が1を超えるSSPが多く、国全体での経済効率性が示された。フィリピンでは潜在的浸水域が広域に分散するため、全ての地域を防護するには費用便益比が低かった。フィリピンにおいては地域を特定し、優先順位を付けた上での詳細なマングローブ植林と防

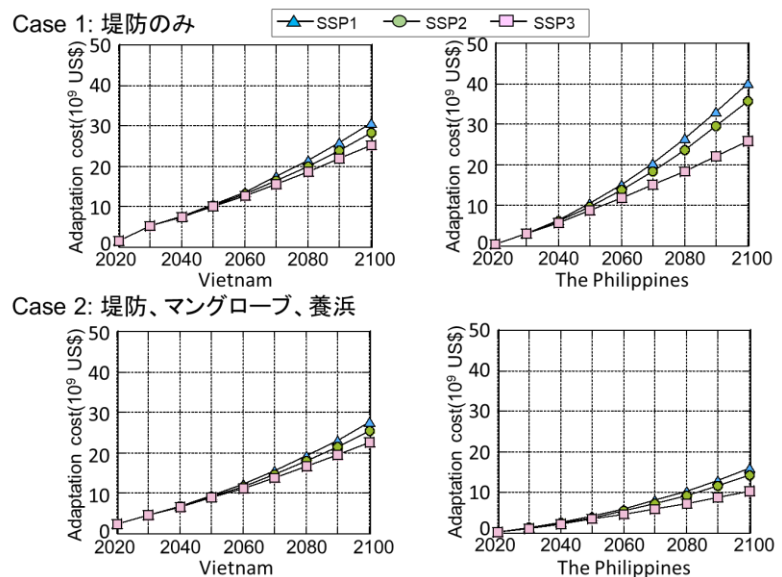


図 4.5.6 フィリピンおよびベトナムの適応費用

護の計画が必要となる。

(6) ライフサイクルを考慮した最適な組合せ（国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所）

マングローブの物理機能評価のために、規則波及び孤立波を対象に水理模型実験を実施し、グリーンインフラによる波浪の減衰効果を定量化した。また、ST1と連携し、波高減衰の効果を数値シミュレーションモデルへ反映するため、グリーンインフラによる抗力 F を表現するための抗力係数および慣性係数を整理した。西表島の実樹木を用いた大規模水理実験では、始めに樹木への作用波力を計測し、先の中型水理模型実験との比較を実施して模型実験の妥当性を検証した。その後、高潮・高波を想定したより大きな波を作用させて樹木の動的応答特性を調べた。その結果、樹木が撓ることによって波力を受け流し、折損しにくい性質をもっていることが明らかになった。樹木は2mにおよぶ波が作用しても破損することが無く、最終的に2.3mの人工津波が作用した際に支柱根が破損（座屈破壊）した。また、水理模型実験にあわせて樹幹の要素载荷試験も実施したところ、マングローブ樹木は大変形しても（大曲率でも）折損することがなく、波に対して樹木が撓りやすく波力を受け流しやすいという水理模型実験の特徴と合致した。

各サブテーマの研究成果をもとに、グリーン、グレイインフラの最適な組み合わせを算定するフローチャート（アルゴリズム）を構築した。このアルゴリズムは背後地域の高潮・高波による浸水を制御するための許容越波量を満足するように構築されており、植林対象地域の波浪条件やグリーンインフラの植林密度・植林幅、グレイインフラ（堤防・護岸）の高さ、植林単価等を入力することで、長期的なライフサイクルコストを算出し、グリーンインフラとグレイインフラの最適な組み合わせを求めることができる。

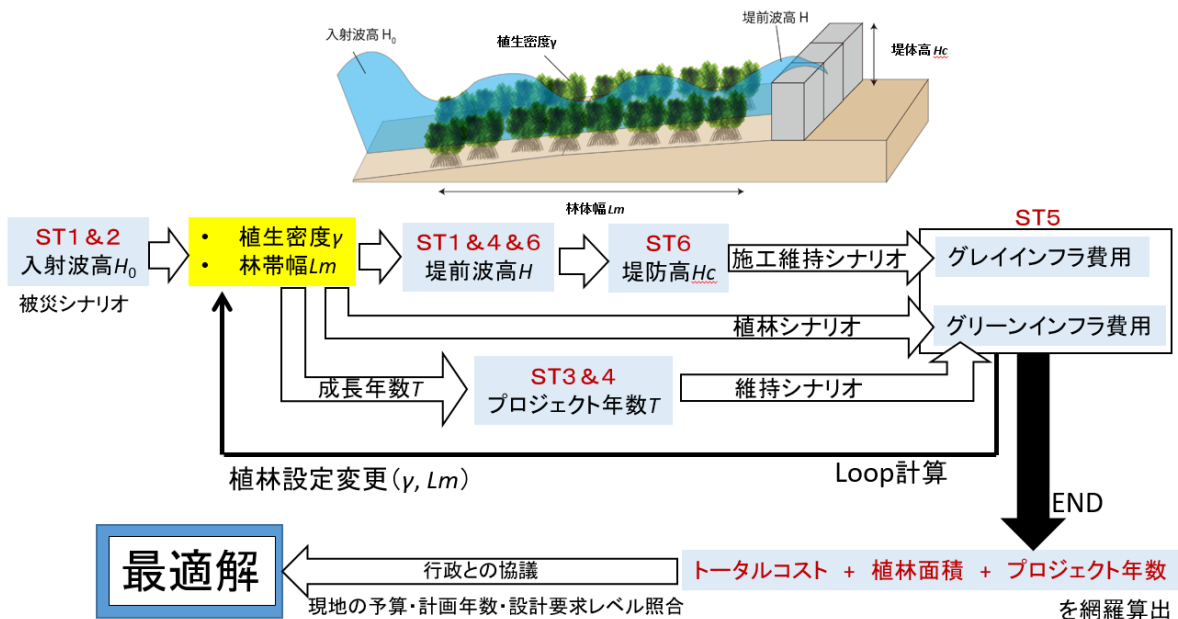


図4.6.3 グリーンインフラとグレイインフラの最適な配置決定のためのフローチャート

5. 本研究により得られた主な成果

サブテーマ1、2では、気候変動の影響を考慮して台風発達から沿岸数kmまでの高潮・高波ハザードを評価可能な大気・海洋・波浪結合モデルを開発した。さらに極浅海におけるマングローブの効果を評価可能とする高解像度波動モデルを開発し、沖合から氾濫まで対応可能なハザード・適応策評価のモデルを構築した。

サブテーマ3、4では、マングローブに関し、数値モデルに必要とされる樹形等の物理的特性を把握し、サブテーマ1で必要な物理的パラメタリゼーションを行った。フィリピンにおける植生とライフサ

イクルについて取り纏めた。また、気候変動に伴う環境変化が生育へ与える影響も温室実験をもとに検討した。

サブテーマ5、6では、項目(1)(2)の評価をもとに対象エリアを絞込み、グリーンインフラによる減災価値をモデル化した。更にグレーインフラを併用した場合のコスト・ベネフィット関係の評価を行った。科学のおよび環境政策への貢献は以下の通りである。

(1) 科学的意義

地球温暖化に伴う台風発生個数、最大発達強度および環境場の将来変化について明らかにした。これより、太平洋における緯度毎の台風の将来変化特性を定量的に把握できた。大気・海洋・波浪結合モデルの開発を進め、大気・海洋・波浪の相互作用を考慮しつつスーパー台風の3つのハザードを同時に評価可能とした。

地球シミュレータにおいて大気、海洋、波浪モデルのそれぞれの演算特性をVPUの使用状況をもとに解析した。ベクトル演算率とベクトル長を高める実装方式を検討し、効率的にシミュレーションができる高解像度結合モデルの開発を進めた。並列処理の効率化についても検討し、演算バランスの最適化方法を開発した。

気温に対するマングローブ植物の生育と形態応答を明らかにした。これにより、マングローブ植林による沿岸保護機能に及ぼす気候変動に伴う気温上昇の影響を評価できるようになった。さらに、フィリピン全土の地形類型化とマングローブ分布整備を行うことで、台風や高潮・高波等の沿岸災害に対するグリーンインフラが効率的に行える地域の抽出が可能となった。

マングローブの波浪低減効果を把握するため、3Dスキャナによるスキャニングとポリゴン化を行い、3Dデジタルデータを作成した。また、現地観測結果をもとに作成したマングローブ特性の成長曲線は、マングローブの成長に応じた波浪減衰効果の経時変化を評価するためには必須であり、広く使われることが期待される。また、マングローブの成長を提案し、森林成長シナリオに対するマングローブ林の波浪低減効果の定量評価を可能とした。

フィリピンにおける海面上昇等の浸水影響、グレー・グリーンインフラの防護費用データベース構築、防護効果と費用便益を解析し、コスト評価の分析枠組みの基礎を確立した。沿岸域における気候変動の影響に関する経済損失評価は既に幾つかの先行研究があるものの、適応策の経済評価はまだ少なく、本研究で解析した資料は貴重である。

未だ十分な検討がなされていない、複雑形状を有するマングローブ林への作用波力および波高減衰効果と周囲の流体場の特性について、立木密度・水深・波条件など複数の異なる条件下で網羅的に実験データを取得した。これらデータは、関連分野における1次資料として貴重である。また、本研究では3Dスキャンと3Dプリントによる実樹木を忠実に再現した模型や実樹木そのものを用いており、これまでに例の無い試みである。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

熱帯・亜熱帯沿岸生態系ポータルサイト (Tropical Coastal Ecosystems Portal <http://www.nies.go.jp/TroCEP/index.html>) において、作成した生態系分布マップと生物情報データを公開することで、環境政策における沿岸生態系情報活用の推進に貢献した。同サイトは環境省ホームページ「我が国の環境政策に関するポータルサイト、日本の環境政策」からもリンクされている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究では、アジア・太平洋島嶼国における気候変動への適応策として、台風・沿岸災害に対するグリーン・グレーインフラの防災効果を統合的な数値モデルを活用して定量化する手法を開発した。一連の成果は、発展途上国における温暖化適応技術としてのマングローブを用いたEco-DRRの研究開発、途上国に対する適応計画策定に直接貢献できる。これより、どの地域に、どの様な対策を実施すべきかが科

学的かつ定量的に評価でき、具体的な計画策定を支援できる。これは、我が国の「気候変動の影響への適応計画」（2015年11月閣議決定）の「基本戦略」の一つに掲げられる、「開発途上国に対する適応計画策定・対策実施支援、防災支援、及び我が国の科学技術の活用」を具体化したものであり、開発途上国に対する国際協力推進に貢献できる。

国際的には、2015年3月の国連防災世界会議で発表された「仙台防災協力イニシアティブ」等を踏まえ、適応技術の研究開発普及、途上国に対する適応計画策定・対策実施支援が掲げられている。更にCOP16の結果をもとに気候変動対策支援のための新たな多国間基金である「緑の気候基金（Green Climate Fund; GCF）」が設立された。これらの国際的な取り組みに対して、優れた環境技術展開促進への活用としての展開が期待される。

科学論文を通じてIPCC第7次評価報告書にも積極的に貢献できるよう、積極的に研究成果のアピールを行う予定である。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上发表

<査読付き論文>

- 1) Mori, N., Shimura, T., Yoshida, K., Mizuta, R., Okada, Y., Fujita, M., Khujanazarov, T. and Nakakita, E., 2019. Future changes in extreme storm surges based on mega-ensemble projection using 60-km resolution atmospheric global circulation model. *Coastal Engineering Journal*, 61(3), pp.295-307.
- 2) Chang, C.W., Mori, N., Tsuruta, N. and Suzuki, K., 2019. Estimation of Wave Force Coefficients on Mangrove Models. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, 75(2), pp.I_1105-I_1110.
- 3) INOUE, T, 2018, T.KUWAE and M.HORI eds. Blue carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy, and Implementation, Springer, pp.373(2018), Carbon Sequestration in Mangroves.
- 4) Akaji, Y., Inoue, T., Tomimatsu, H. and Kawanishi, A., 2019. Photosynthesis, respiration, and growth patterns of *Rhizophora stylosa* seedlings in relation to growth temperature. *Trees*, 33(4), pp.1041-1049.
- 5) Yamano, H., Inoue, T., Adachi, H., Tsukaya, K., Adachi, R. and Baba, S., 2019. Holocene sea-level change and evolution of a mixed coral reef and mangrove system at Iriomote Island, southwest Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 220, pp.166-175.
- 6) 大友萌子, 調査資料 旧米国陸軍地図局刊行の地形図を利用した GIS データ整備--ホーチミン市一帯のマングローブ湿地を対象に. 地域構想学研究教育報告, (6), pp.71-78.
- 7) 熊野直子, 田村誠, 井上智美, 横木裕宗, 2018. フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果. 土木学会論文集 G (環境), 74(5), pp. I_395-I_404.
- 8) 熊野直子, 田村誠, 横木裕宗, 2019. 海面上昇に対するグリーンインフラによる適応効果と費用の検討. 土木学会論文集 G (環境), 75(5), pp. I_339-I_350.
- 9) Tamura, M., Kumano, N., Yotsukuri, M. and Yokoki, H., 2019. Global assessment of the effectiveness of adaptation in coastal areas based on RCP/SSP scenarios. *Climatic change*, 152(3-4), pp.363-377.
- 10) Tamura, M., Yasuhara, K., Ajima, K., Trinh, V.C. and Pham, S.V., 2018. Vulnerability to climate change and residents' adaptations in coastal areas of Soc Trang Province, Vietnam. *International Journal of Global Warming*, 16(1), pp.102-117.

<その他誌上发表(査読なし)>

- 1) 毎日新聞 (2018年6月, 全国版, 「マングローブ実験」) (ST1と共同)

- 2) 日経 xTECH/日経コンストラクション (2019年3月, 「期待の新インフラ「樹木」、減災評価手法の確立へ」) (ST1と共同)

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) Chang, C.W., Naoki Tsuruta, Kojiro Suzuki, Nobuhito Mori (2018) An experimental study on water waves through model mangrove forests, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) annual meeting, Hawaii.
- 2) Chang, C.W. and P. Liu (2018) Harmonic generation in coastal forest, 36th International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2018), ASCE, Baltimore.
- 3) Chang, C.W., N. Mori, N. Tsuruta, K. Suzuki (2019) On the Interactions between Water Waves and Mangrove Trees: Physical Modeling in Two Scales, AOGS2019, Singapore, 2019/7.
- 4) Mori, N., M. Takagi, J. Ninomiya, T. Shimura (2019) Revised parameterization of wave induced turbulent kinetic energy for upper ocean surface mixing, 2nd International Workshop on Waves, Storm Surges, and Coastal Hazards 16th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Melbourne, 2019/11.
- 5) Singh, S. K. et al. (2019) Development of optimized COAWST for the vector supercomputers, The 29th Workshop on Sustained Simulation Performance, Sendai, Japan, March, 2019.
- 6) 森信人, 竹見哲也, 志村智也, 二宮順一, 西川敦子, 浦口あや, 撫佐昭裕, 板倉耕太, 後藤浩二, 平陽介, ” 気候変動に伴う台風・沿岸災害ハザードの長期評価手法の開発”, 地球シミュレータ利用報告会, 品川, 3月5日, 2019.
- 7) T. INOUE: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017, “Function of mangrove plants-Roots and soil chemicals.”
- 8) H. YAMANO and T. INOUE: Environmental Scientists Network for Asia-Pacific Islands, Okinawa, Japan, 2017 “Conservation and evaluation of the functions of coastal ecosystems for ecosystem-based management of tropical and subtropical islands.”
- 9) 赤路康朗, 井上智美: 日本生態学会第 66 回大会 (2019) 「日中および夜間の生育温度上昇に対するヤエヤマヒルギ実生の形態的・生理的変化」
- 10) 柳澤英明, 宮城豊彦 (2018) 3Dレーザースキャナーを用いたマングローブ形状の測定とその展開、日本マングローブ学会 2018年大会 公開シンポジウム
- 11) 柳澤英明, 宮城豊彦, 会田俊介 (2019) 3D マングローブ模型を用いた津波減勢効果の検討, 日本地理学会秋季大会, 新潟
- 12) Kumano, N., M. Tamura, T. Inoue, H. Yokoki, 2019 AGU Fall Meeting, Moscone west, San Francisco, December 10, 2019 “Estimating the cost of coastal protection using mangrove forests against sea level rise in the Philippines and Vietnam,”
- 13) Tamura, M., N. Kumano, H. Yokoki, International Workshop: Natural Resources, Human Resources, and Risk Management in the Context of Climate Change, Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam, January 10, 2020. (Outstanding poster presentation award) “Assessment of the effectiveness of adaptation against global sea-level rise”
- 14) 熊野直子, 田村誠, 井上智美, 横木裕宗: 第 26 回地球環境シンポジウム (2018) 「フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果」
- 15) 熊野直子, 田村誠, 横木裕宗: 第 27 回地球環境シンポジウム, 富山国際会議場, 2019/8/29
「海面上昇に対するグリーンインフラによる適応効果と費用の検討」
- 17) Tsuruta, N. (2018) Application of new technology to design and maintenance of port structures, the 6th KIOST-PARI-CDIT-WAVE Joint Workshop Program, Fukuoka, Japan.

7. 研究者略歴

研究代表者

森 信人

岐阜大学大学院修了、博士（工学）、現在、京都大学防災研究所教授

研究分担者

1) 撫佐 昭裕

東北大学大学院情報科学研究科 博士後期課程修了、博士（情報科学）

現在、NEC第一官公ソリューション事業部主席システム主幹

2) 井上 智美

千葉大学自然科学研究科 博士後期課程修了、博士（理学）、

現在、国立研究開発法人 国立環境研究所 主任研究員

3) 柳澤 英明

東北大学大学院工学研究科修了、博士（工学）、

現在、東北学院大学地域構想学科准教授

4) 横木 裕宗

東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）、

現在、国立大学法人 茨城大学 大学院理工学研究科教授

5) 鈴木 高二朗

東京大学大学院 工学系研究科修了、博士（環境学）

現在、港湾空港技術研究所海洋研究領域耐波研究グループグループ長

II. 成果の詳細

II-1 温暖化による台風増加と沿岸ハザード評価

国立大学法人京都大学

防災研究所

森 信人・Che-Wei Chang・竹見 哲也

志村智也

国立大学法人金沢大学

理工研究域 地球社会基盤学系

二宮 順一

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：30,336千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：9,442千円、平成30年度：8,096千円、令和元年度：12,797千円）

[要旨]

気候変動に伴う沿岸災害減災のため、マングローブのグリーンインフラの効果を考慮した、台風から高潮・高波の遡上を考慮した評価モデルを開発する。本サブテーマでは、IPCC報告書等をもとに、気候変動に伴う台風特性等の将来変化についてとりまとめた。ついで、大気・海洋（高潮）・波浪結合モデルを構築し、台風による沿岸ハザードの評価モデルを開発し、過去の極端事例を対象に再現実験を実施した。さらに、マングローブの効果を考慮した位相解像型の波動モデルを開発し、大気・海洋・波浪結合モデルを外力として、マングローブの物理的機能を評価可能なモデルの構築を行い、マングローブによる波浪減衰効果の定量化を可能とした

[キーワード]

地球温暖化、疑似温暖化実験、ダウンスケール、高波、波浪減衰

1. はじめに

2005年ハリケーン・カトリーナ、2013年台風Haiyanなど、強い熱帯低気圧による沿岸災害の事例が多く記録されている。北大西洋では、衛星観測が開始した1970年代以降で見ると、強い熱帯低気圧の頻度と強度が増大していると評価されている。残念ながら、長期的な観測値の不足により、個々の海域における熱帯低気圧の長期的な変化傾向は未だよく理解されていない。一方、地球温暖化に係る研究の進展により、全球大気モデル（GCM）による21世紀末の将来変化については、ここ十年で理解が進んでいる。全球での熱帯低気圧の発生頻度は減少もしくは変化なしという可能性が高く、熱帯低気圧の風速や気圧は全球平均的には強まる可能性が高いと評価されている。2013年にフィリピンを襲った台風30号 Haiyan のような900hPaを切る強い台風による高潮・高波による沿岸部の被害が報告されており、IPCC第5次評価報告書（AR5）WGIIにおいても、熱帯低気圧の将来変化が生じた場合の災害リスクの増大の可能性が指摘されている。特に、高潮と高波の21世紀末における増大は「可能性が非常に高い」（very likely）とされており、近未来における変化も「可能性が高い」（likely）とまとめられている。ただし、特定地域における高潮・高波の変化についての予測の不確実性は大きく、特に高潮の将来変化予測の確信度は低いことが明記されている。

マングローブは、二酸化炭素固定効果が見込めるため、緩和策としての効果が認められてきた。一方で、津波や波浪の沿岸ハザードの軽減効果としてのグリーンインフラストラクチャ（グリーンインフラ）としての役割も大きい。2004年のインド洋津波では、マングローブによる減災効果が観測され、沿岸災害の軽減策として「グリーンインフラ」の価値が注目され、Eco-Disaster Risk Reduction(Eco-DRR)として導入が行われてきた。しかし、ハザードのどの程度の強さに対して、マングローブの減災効果がどの程度あるのかという科学的知見が不足している。

本サブテーマでは、大気・海洋（高潮）・波浪結合モデルを構築し、台風による沿岸ハザードの評価モデルを開発し、過去の極端事例を対象に再現実験を実施した。さらに、マングローブの効果を考慮した位相解像型の波動モデルを開発し、大気・海洋・波浪結合モデルを外力として、マングローブの物理的機能を評価可能なモデルの構築を進めた。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、IPCC報告書等をもとに、気候変動に伴う台風特性の将来変化についてとりまとめる。大気・海洋・波浪結合モデルを構築し、再現実験を実施する。マングローブの効果を考慮した位相解像型の波動モデルを開発する。台風・高潮・波浪評価モデルに温暖化の影響を考慮し、特定対象地域に対して、シミュレーションを開始する。マングローブの効果を考慮するための位相解像型の波動モデルを高度化し、統合モデルと接続する。台風・高潮・波浪評価モデルにマングローブの効果を本格的に結合し、広範囲のシミュレーションを実施し、ハザードの広域マッピングを行う。

3. 研究開発方法

本サブテーマでは、まず始めにIPCC報告書等をもとに、気候変動に伴う台風特性等の将来変化についてとりまとめる。これより、地球温暖化に伴う将来気候条件における台風、高潮、波浪の将来変化についての予測結果を把握するとともに、後述する位相解像型波動モデルに対する初期・側方計算条件の整備を行う。これと並行して、大気・海洋（高潮）・波浪結合モデルを構築し、台風による沿岸ハザードの評価モデルを開発し、過去の極端事例を対象に再現実験を実施する。さらに、マングローブの効果を考慮した位相解像型の波動モデルを開発し、大気・海洋・波浪結合モデルを外力として、マングローブの物理的機能を評価可能なモデルの構築を進める。モデルの概略図を図3.1.1に示す。

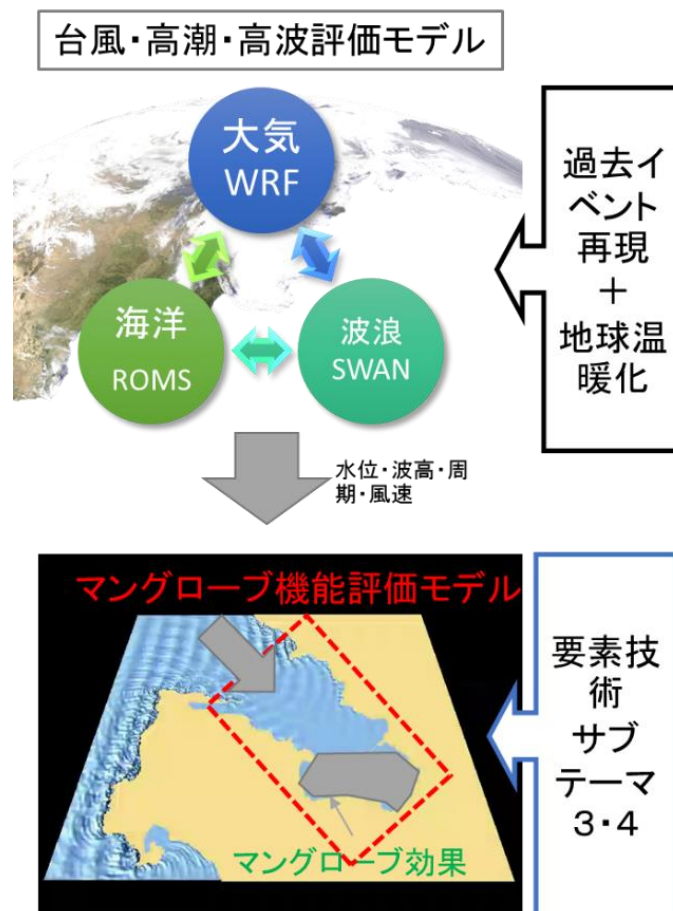


図3.1.1 サブテーマ1で開発される数値モデルの概要

4. 結果及び考察

IPCC報告書および大規模気候アンサンブル実験d4PDFを解析し、気候変動に伴う台風特性の変化についてとりまとめた。大気・海洋・波浪結合モデルの開発およびチューニングを行い、2013年台風Haiyanを対象に再現実験を実施した。台風・高潮・波浪評価モデルに温暖化の影響を考慮し、2013年台風Haiyanを対象にシミュレーションを実施した。これと並行して、マングローブの効果を考慮した位相解像型の波動モデルの開発を行った。マングローブの効果を考慮するための位相解像型の波動モデルを高度化し、台風・高潮・波浪評価モデルを沖境界条件としてマングローブの効果を考慮可能とした。地形ずらし法により、台風経路のコントロールを可能とし、広範囲を対象としたシミュレーションを実施した。ハザードのマッピングを除いて、ほぼ計画通りの成果を得た。

4.1.1 気候変動に伴う台風・気候特性の将来変化

気候変動に伴う台風特性の将来変化についてとりまとめ、地球温暖化に伴う将来気候条件における台風、高潮、波浪の将来変化についての予測結果を把握した。台風の将来変化については、CMIP5の代表的なモデルと「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)」による定常+4Kシナリオに基づく気候変動予測実験結果を解析した。

まず、d4PDFをもとに、過去と全球平均気温+4K上昇時の将来気候条件下での台風の中心気圧の将来変化について解析を行った。図4.1.1に示すのは海域毎の年間発生個数の確率密度分布である。温暖化に伴い、台風の発生個数は顕著に減少し、将来気候での発生個数は、全球で54.7個/年と35%の減少となり、先行研究による同じAGCMを用いたRCP8.5シナリオの結果よりも、大きな将来変化率を示した。北西太平洋(WNP)の将来変化は全球とほぼ同様であるが、南太平洋(SPO)の将来変化はやや弱いことがわかった。ついで、台風強度の将来変化について解析した。台風の中心気圧は将来気候条件において顕著に低下する。特に将来変化が顕著となるのは、940hPa以下の強い台風であり、全発生数は減少するものの、920hPa以下の台風の超過確率は1桁増加することがわかった。d4PDFでは、5000年以上の積分が行われているので、再現年数100年以上の直接的な長期評価が可能である。図4.1.2に示すのは、再現年数100年の海上風速の将来変化である。100年確率風速が40m/sを超える海域は、極域以外は熱帯低気圧が支配的な15度以上の緯度帯で広く見られ、特に北西太平洋の日本の南側の海域に集中している。100年確率風速の将来変化は、20%程度増加と15%程度減少する2つの海域にわけられる。風速の増加が見込まれる海域は、北半球では北緯20～40度、南半球では同緯度の南インド用西岸域であり、赤道を挟んだ低緯度帯では大きな減少が見込まれる。

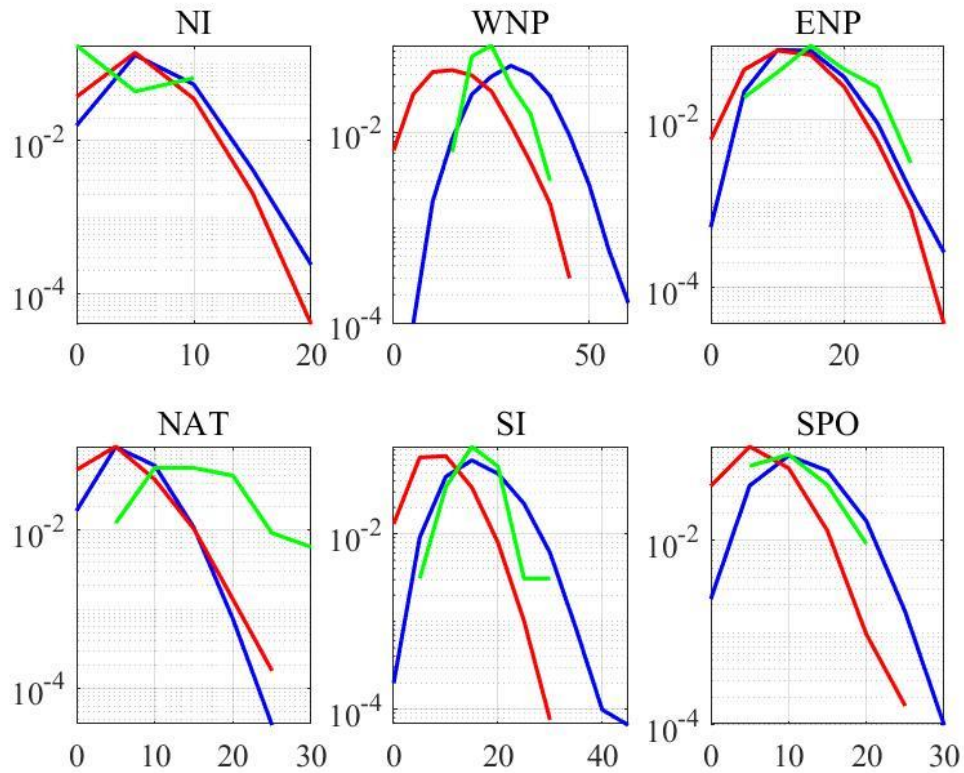


図4.1.1 d4PDFにもとづく台風の年発生個数の将来変化（青線：現在気候、赤線：+4K将来気候、緑線：観測データ、NI：北インド洋、WNP：北西太平洋、ENP：北東太平洋、NAT：北大西洋、SI：南インド洋、SPO：南太平洋）

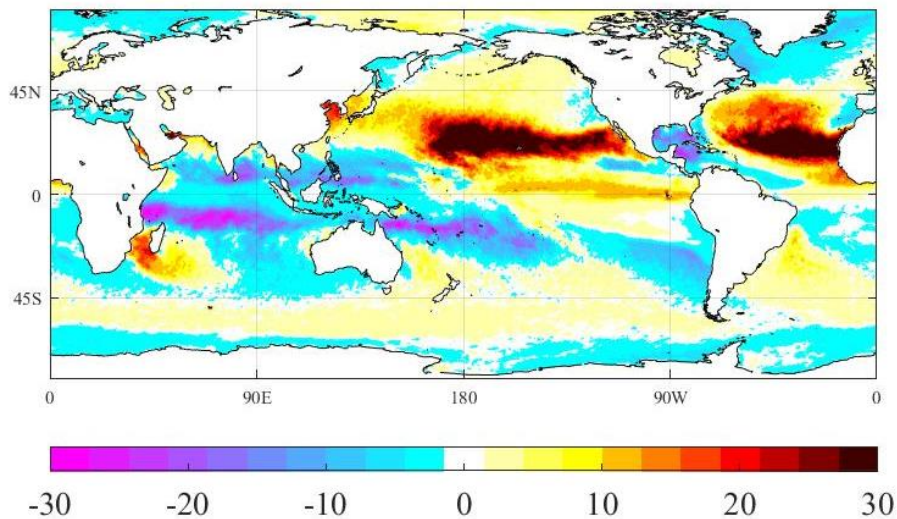


図4.1.2 d4PDFにもとづく再現年数100年の海上風速の将来変化（単位%）

ついで、CMIP5データをもとに、台風の最大潜在強度（Maximum Potential Intensity; MPI）の理論に着目し、台風環境場の将来変化について解析した。RCPシナリオごとに昇温幅や大気の実定性は大きく異なり、それによってMPIの変化傾向も異なることがわかった。北西太平洋に解析対象領域を取り、MPIの空間平均値をMPIとし、その現在気候と将来気候間の変化量 Δ MPIを調べた。図4.1.3に台風発達域として定義した北西太平洋の南北4領域における将来変化を示す。図中の負の値は将来MPIが強くなることを

示す。将来変化は、台風シーズンにおいて最も変化量が顕著であり、北にいくほど将来MPIが強くなる傾向にあることがわかった。これは全RCPシナリオに共通していた。特に北緯17.5°より北の領域2から4では、冬季の変化量はほぼ0であり、台風シーズンで強度が強くなる傾向にある。一方、低緯度の領域1では、RCP2.6と4.5では年を通して強度の強化量はほぼ横ばいで5 hPa以下であるが、RCP6.0では台風シーズンにおける強化傾向が弱く、RCP8.5の台風シーズンでは弱体化に転じている。また、変化量、ばらつきともにRCP8.5で最も大きい。温暖化により大気の大気安定性は増加するので、現在気候においてすでにMPIが強い南の領域については、温暖化によって必ずしも強度が増加するわけではなく、逆に強度が弱まる可能性があることも示唆された。

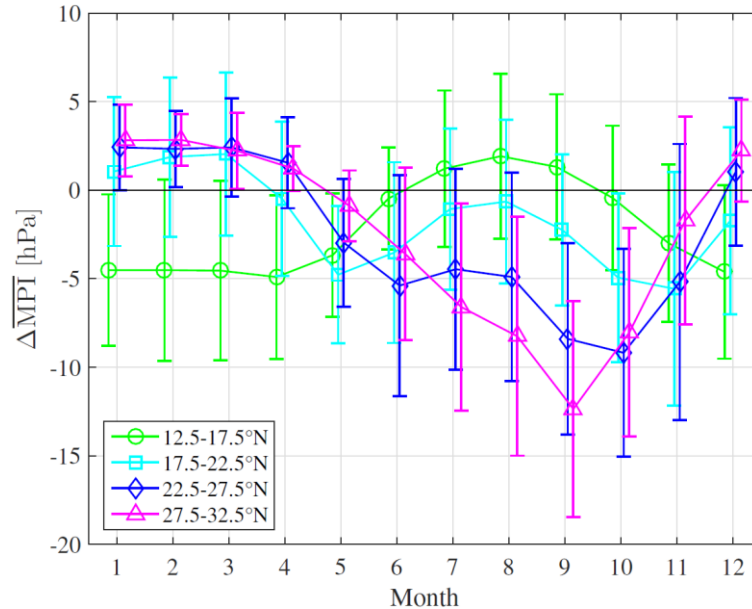


図4.1.3 CMIP5モデルの台風発達域の南北方向のMPI将来変化：RCP8.5シナリオ
(マーカー：モデル間平均値、バー：モデル間標準偏差)

4.1.2 大気・海洋（高潮）・波浪結合モデルの開発

大気・海洋・波浪の評価について、相互作用を考慮した結合モデルとして、USGSが開発したCOAWST(Coupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport Modeling System)をベースとしたモデル開発を行った。COAWSTは、大気がWeather Research and Forecasting (WRF)、海洋（高潮）がRegional Ocean Modeling System (ROMS)、波浪がSimulating WAVes Nearshore (SWAN) modelモデルで構成され、それぞれ自由度が高いコミュニティモデルである。WRFはNCAR、NCEP、NOAAなどの研究機関が共同で開発を行った非静力学モデルである。ROMSはRutgers大学、UCLAなどで共同開発されたプリミティブ方程式を支配方程式とする準3次元海洋モデルである。SWANはデルフト工科大学で開発された深海域から極浅海域まで対応するスペクトル法を用いた第3世代波浪モデルである。これらを図4.1.4に示すような組み合わせで構成し、大気・海洋・波浪の相互作用を考慮できるモデル開発を行った。更に、現在再現計算および将来計算に必要な初期および側方境界条件データ等の整備を行った。

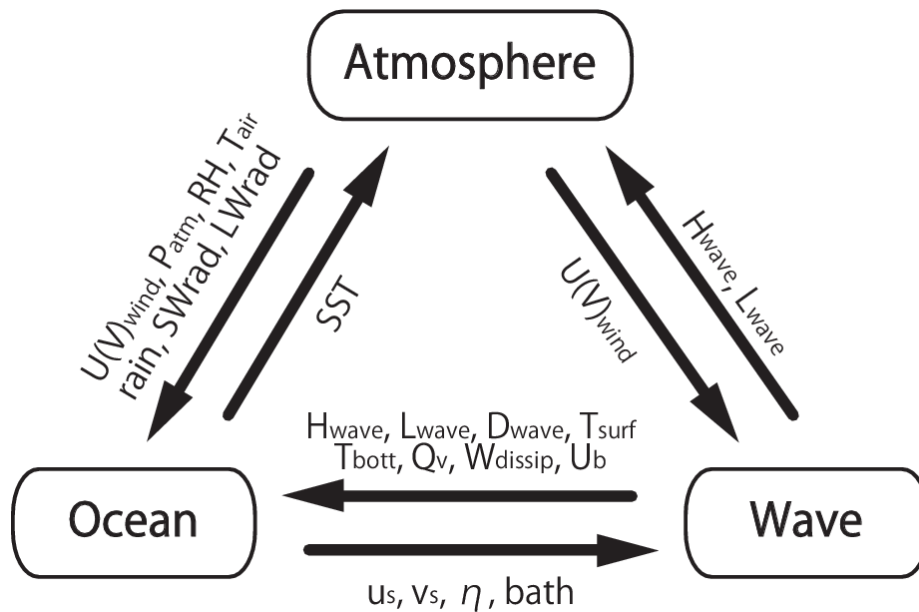


図4.1.4 大気・海洋（高潮）・波浪結合モデルの概要

大気・海洋・波浪結合モデルの極端な台風・沿岸災害への検証として、2013年台風Haiyanを対象に環境場の作成と過去再現実験を実施した。大気側の境界条件は、気象庁55年長期再解析プロジェクト（JRA-55）を用いて各条件を与えた。一方、海洋の条件設定は大気に比べて任意性が高く、Simple Ocean Data Assimilation ocean（SODA）（外力2種類）およびHYbrid Coordinate Ocean Model（HYCOM）の再解析データを比較し、計算結果から妥当性を検討した。波浪についての初期条件は風速依存の波高と周期を、側方境界条件はNOAAによるWAVEWATCH III再解析値を与えた。WRF単独モデルのSSTおよび結合モデルでの初期条件は、台風の影響があまり大きくないことが望ましいため、SODAの解析値を結合モデルの計算に利用することとした。空間解像度は、WRFは3km, 1kmの2ドメイン、ROMSとSWANは3kmの1ドメインと設定した。主な計算条件を表4.1.1に、計算領域を図4.1.5に示す。

WRF-ROMS-SWANを結合した大気海洋波浪結合モデルでは、大気海洋間の運動量および熱交換のバルク式のパラメタリゼーションが重要となる。そこで、運動量交換係数 C_d には風速依存のCharnock式（Wind式）と波形勾配依存のTaylor and Yellandの提案式（Wave式）を用いて結果の比較を行った。また、高風速下で C_d が一定値を持つ条件を付した。海洋表層熱量評価には海洋混合層厚さ（MLD）を浅く変更した実験を行った。台風観測値には気象庁（JMA）とJoint Typhoon Warning Center（JTWC）によるBest Trackデータ（BT）を用いる。

Haiyan発生時の水温の気候値の解析を行った。図4.1.6に示すのは、台風発達域における11月の海洋表層水温鉛直分布である。図中の黒線は気候値と標準偏差、赤線は2013年（MLD10）、緑線はMLDを20%減らした分布（MLD08）、青線はMLDを40%減らした水温（MLD06）の鉛直分布である。海面水温（SST）はほぼ平年値である一方で、混合層は平年に比べて26%大きく、水深50mから300mの水温は $+\sigma$ 付近で分布していた。このため2013年のTCHP（Tropical Cyclone Heat Potential）は平年値に比べて20.8%大きく、台風の発達しやすい環境にあった。

運動量交換係数 C_d について、Wind, Wave式およびそれらに上限を設定した4ケースの実験を行った。図4.1.7に示すのは、 C_d を変更した台風特性の時間変化を示す。上側の図は中心気圧、下側の図は最大風速の時間変化を示し、○は気象庁JMAベストトラックデータBT、×JTWCのベストトラックデータBT、実線は C_d を変更した計算結果である。中心気圧 P_{min} は、最発達期で一致するがJTWCがJMAに比べて早く発達し、遅く衰退する傾向を示した。非結合（Wind）、波浪結合（Wave）間に大きな違いはなく、中心気圧 P_{min} は C_d 上限の影響を強く受けることを確認した。最大風速はJTWCで30%ほど大きく推定される傾向があった。 P_{min} と同様に、WindとWave間の違いは小さく、 C_d 上限の影響が強い傾向がある。中心気圧は C_d 上限

なしが、最大風速は C_d 上限ありがBTに近い推定値を示した。台風中心を基準にしたコンポジット解析の結果、 C_d 上限なしでは中心向きの風が強まり、台風の直径が小さく締まった結果となった。

結合モデルでは、海洋混合層厚さ (MLD)の影響は台風特性に影響を与える。そこで、MLDを変更して実験を行った。図4.1.8に示すのは、MLDを変更した台風特性の時間変化である。計算初期の11/5 18:00頃までの発達ケース間で差がないが、 P_{min} が950hPaを下回る時点から発達に差が生じた。ただし、MLDの影響は発達のスピードの遅延のみに影響した。台風による強混合に対して、台風の移動速度が速く、海面水温SST低下の影響が小さくなったと考えられる。層厚さMLD10の計算条件では、台風通過に対してSSTがほとんど低下していない一方で、台風通過前に大きなTCHPを持つため、混合層下部での水温低下がTCHPを大きく変動させた。SSTは台風の接近から急速に低下し、TCHPはSSTに比べて半日程度の時間遅れを持って徐々に低下した。SSTおよびTCHPの低下は短波放射の影響を受けるため、昼に通過する地点で大きくなる傾向があった。

最後に、図4.1.9に示すのは、再現計算における有義波高の最大値の空間分布である。フィリピンの太平洋側で台風最接近時の最大の有義波高は8mを超え、場所によっては沖合で15mとなっている。一方、太平洋側から西側に入った海域では最大の有義波高は4m以下であり、島による遮蔽効果が大きいために海域ごとの差が顕著であることがわかる。

表4.1.1 計算条件

Model	Resolution	H. Grid	V. Grid	Initial and Boundary
WRF D1	3km	1334x667	56	NCEP FNL
WRF D2	1km	2002x703	56	Nesting
ROMS	3km	1334x667	40	SODA v3.4.2
SWAN	3km	1334x667	Dir:24 Freq:24	NOAA Reanalysis

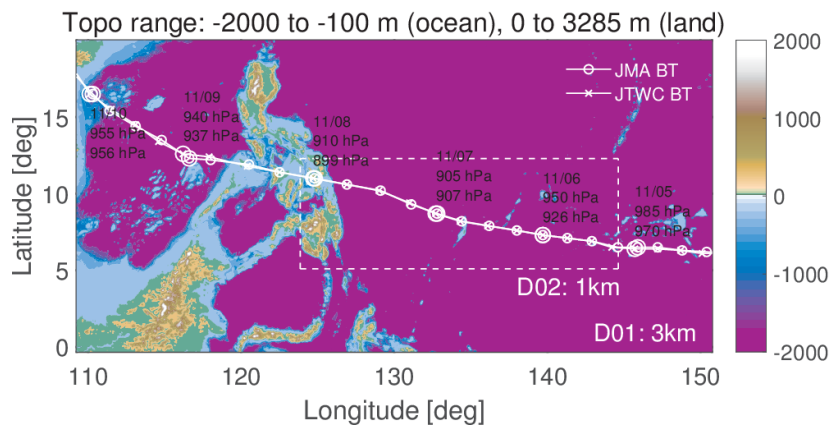


図4.1.5 計算ドメインと地形分布

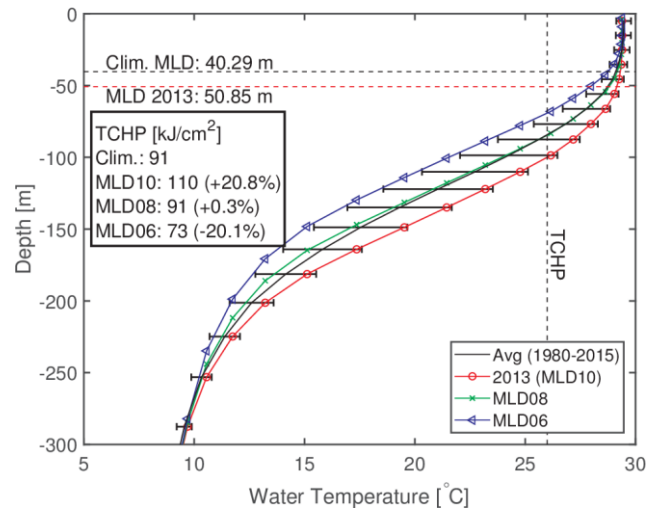


図4.1.6 台風発達域における11月の海洋表層水温鉛直分布（黒：気候値と標準偏差，赤：2013年（MLD10），緑：MLDを20%減らした分布（MLD08），青：MLDを40%減らした分布（MLD06））

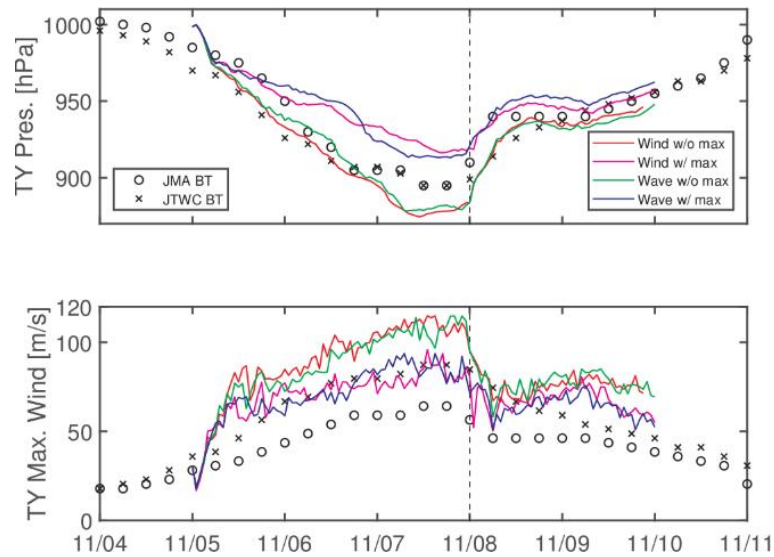


図4.1.7 Cdを変更した台風特性の変動（上：中心気圧，下：最大風速，○：JMA BT，×：JTWC BT，実線：Cdを変更した計算結果）

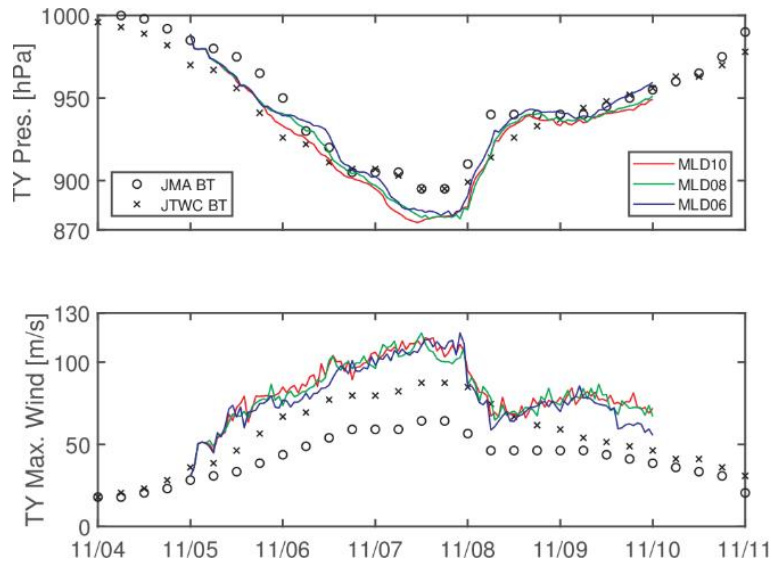


図4.1.8 MLDを変更した台風特性の変動（図4.1.7と同じ。ただし、実線：MLDを変更した計算結果）

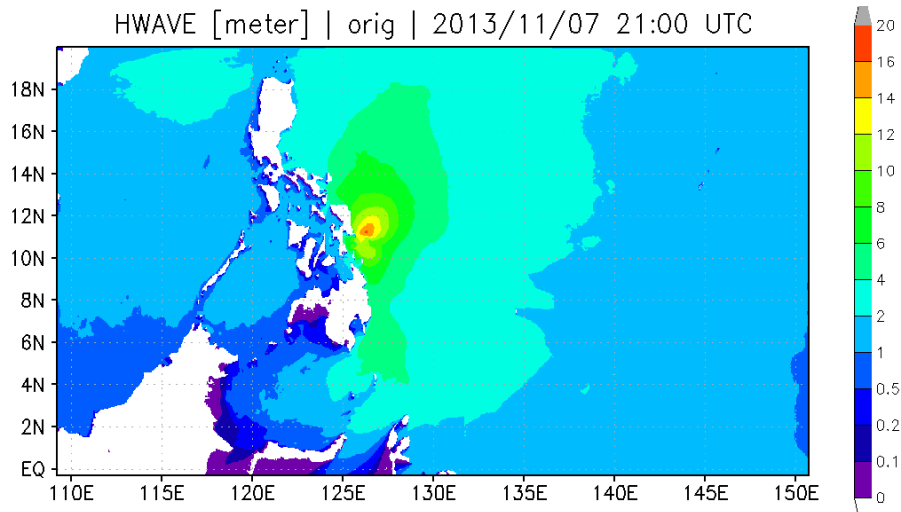


図4.1.9 再現計算における有義波高の最大値の空間分布（単位:m）

4.1.3 マングローブの効果を考慮した位相解像型の波動モデルの開発

沿岸域における波浪災害軽減のための生態系/グリーンインフラストラクチャ/Eco-DRRのアプローチの主要なタイプの1つとして、マングローブ林がある。マングローブが持つ独特の根形状は、波浪のエネルギーの反射や散逸を高めるのに効果的であることは広く知られている。しかし、ほとんどの数値モデルは、マングローブの形状構造の複雑さを簡略化して評価しており、波浪の減衰効果の定量化の不確実性は高い。そこで、ブシネスク型波浪モデルを対象に、実験結果に基づいてマングローブの波浪減衰効果を組み込み、マングローブ林を通過する波の伝播・減衰を評価可能なモデルを開発した。マングローブの根張りの鉛直構造、抵抗係数のパラメタリゼーションについて文献調査を進めると共に、他サブテーマ実施の水槽実験からの知見を活用し、新しいパラメタリゼーションをおこなった。

マングローブの効果を考慮した位相解像型の波動モデルの開発のため、Boussinesq方程式を基礎式とするコーネル大学開発COULWAVEをベースモデルとしたモデル開発を開始した。モデルでは流速の鉛直分

布を考慮可能とし、水位および流速に対応したMorison式をベースとした抵抗力としてマングローブによる減衰力を考慮可能なモデル開発を進めた。図4.1.10に示すように、マングローブの根張りの鉛直構造を考慮したパラメタリゼーションを行い、これを抗力としてBoussinesq方程式に付加し、マングローブによる高潮・波浪の減衰効果を考慮できるように改良を開始した。

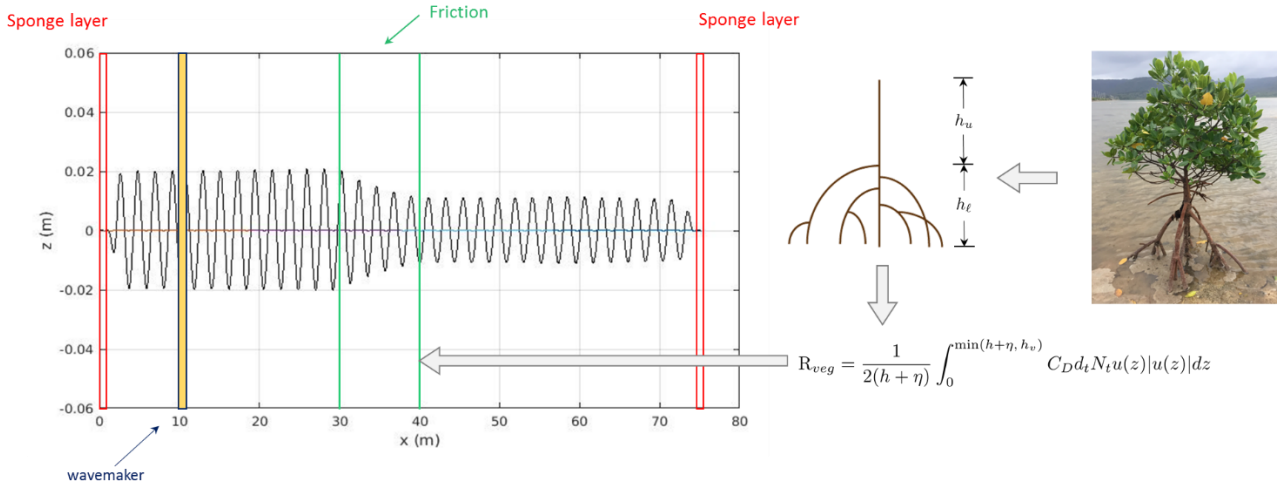


図4.1.10 マングローブを考慮した位相解像型の波動モデルと波浪減衰のテスト計算結果
(青線：造波境界、赤線：吸収境界、緑線の間：マングローブのダンピング区間)

支配方程式として、強非線形・弱分散のブシネスク型モデルを用いた。一般的なブシネスク方程式に底面せん断によって引き起こされる粘性効果と乱流混合を考慮している。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial H U_{\alpha i}}{\partial x} + Q_c = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H U_{\alpha i}}{\partial t} + \frac{\partial H U_{\alpha i} U_{\alpha j}}{\partial x_j} + g H \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + H Q_{m i} + U_{\alpha i} Q_c - H \frac{\partial}{\partial x_j} (2 \nu_t^h S_{i j}) + 2 H \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_t^v \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right) + \frac{\tau_i^b}{\rho} - H R_i - H R_i^{v g} = 0 \quad (2)$$

ここで、 H は全水深（=水深 h +水表面 η ）であり、 $U_{\alpha i}$ は水深 z_{α} における水平速度を意味する。さらに、 Q_c および Q_m は、2次オーダーの周波数分散と渦度（回転）補正、底面せん断応力 τ_i^b とその誘起渦度も運動量方程式に含まれ、 ν_t^h および ν_t^v は水平および垂直渦粘度、 R_i は碎波に関連する散逸と分散応力である。運動方程式に付加した $R_i^{v g}$ がパラメタライズされたがマングローブ効果項である。これまでの研究で用いられている底部摩擦として付加されたマングローブ効果項と異なり、Morisonタイプの式を用いて、抗力と慣性力として表現した。

$$R_i^{v g} = \frac{1}{2H} C_D N_t^{v g} \int_{-h}^{\eta} (U|U|)_i d\mathbf{A}(z) + \frac{1}{H} C_M N_t^{v g} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial U_i}{\partial t} d\mathbf{V}(z), \quad N_t^{v g} : \text{stem density} \quad (3)$$

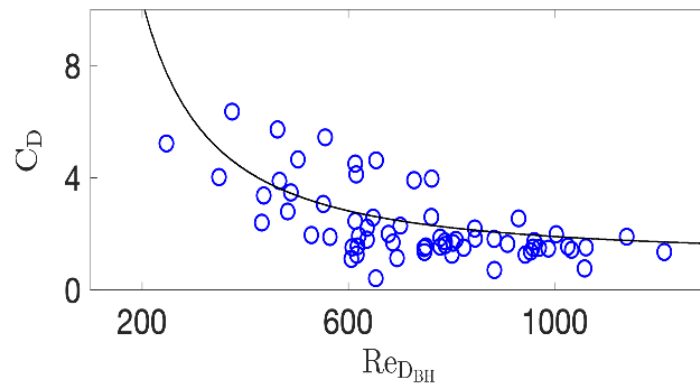
ここで、マングローブの形状構造の複雑さは、垂直方向に変化する鉛直投影面積 $\mathbf{A}(z)$ と没水体積 $\mathbf{V}(z)$ として考慮される。式(3)中の抗力係数 C_D と慣性係数 C_M は、経験的に決定されるものである。本研究では、他サブテーマと協力して、実験を実施し決定した。式(3)と(2)を組み合わせると、マングローブ効果は抵抗 $R_i^{v g}$ としてパラメタ化され、マングローブ林による波浪の減衰をシミュレーションできる。

これまでのマングローブによる波浪減衰モデルでは、摩擦項として扱われることが多かった。本研究では、マングローブ効果を抗力と慣性力としてパラメタ化した。パラメタライズする際に、他サブテーマと協力し、現地において3Dスキャナーでスキャンしたマングローブの3D構造を解析し、これを3Dプリンターで縮小印刷した模擬マングローブ林を用いて水槽実験を行った。図4.1.11に、実験により得られた抗力係数および慣性力係数とReynolds数およびKeulegan-Carpenter (KC) 数との関係を示す。図中

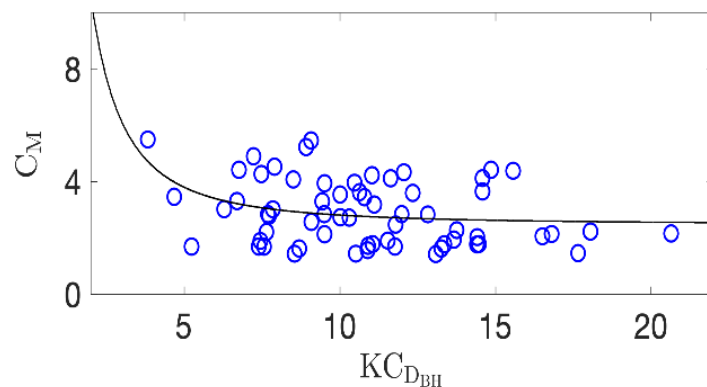
の最適化係数を式 (3) に代入することにより、マングローブによる運動量散逸を数値モデルで表現することができる。

ここでは、2つのベンチマークの例を示す。まず、水深 $h=0.86\text{m}$ 、波長 $L=7.7\text{m}$ の条件における断面2次元場での規則波の波浪変形の計算を行った。図4.1.12はその結果であり、図左はマングローブ林なし、右はマングローブ林有の結果であり、上から下に向かって時間が経過している。図中の黒実線は水面変位 η 、青実線は海底地形、図中のハッチがマングローブ林帯を意味する。図4.1.12からわかるように、水深の変化により急激な波浪変形、特に高周波モードの発生による急峻な波形が計算されている。マングローブ林（幅 $W=35\text{m}$ 、幹密度 $=2.4/\text{m}^2$ ）が構造物の前に植えられた図右列の計算結果では、マングローブ林によるエネルギー散逸による波高減衰が表現されている。

図4.1.13は、水深 $h=1.0\text{m}$ の条件における断面2次元場での計算結果である。図4.1.12と異なり、津波を模擬した孤立波が勾配 $1/20$ の斜面へ遡上した場合の結果であり、斜面に沿ってマングローブ林（幅 $W=10\text{m}$ 、幹密度 $=0.6/\text{m}^2$ ）を設定し、波の遡上特性の変化を調べた。規則波と異なり、孤立波では式 (3) の慣性力はほぼ無視でき、抗力効果が支配的になるため、波の減衰に対するマングローブの効果は、通常波と孤立波で異なることが分かった。図4.1.13の時刻 $t_1\sim t_3$ では、孤立波が斜面まで這い上がる前のスナップショットを示している。これ以降の時間 $t_4\sim t_6$ では、マングローブ林の有無による遡上距離ができる。この計算条件では、マングローブ林は遡上高さを約30%減少することが評価できた。



(a) 抗力係数



(b) 慣性力係数

図4.1.11 水槽実験で得られた抗力係数および慣性力係数とReynolds数およびKeulegan-Carpenter (KC) 数との関係 (○: 実験結果、実線: 経験式、Reynolds数およびKeulegan-Carpenter (KC) 数におけるマングローブの代表長さは DBH で定義した)

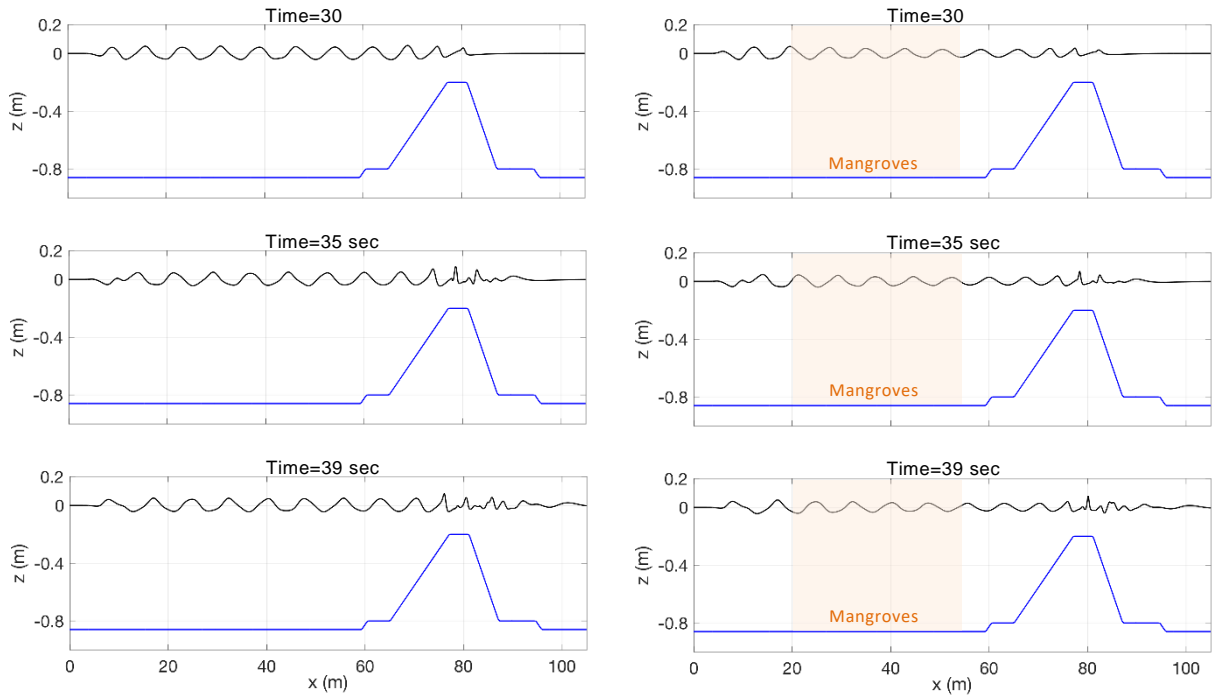


図4.1.12 規則波を対象とした波浪変形計算結果：水深 $h=0.86\text{m}$ 、波長 $L=7.7\text{ m}$ （左：マングローブ林なし、右：マングローブ林有、黒実線：水面変位、青実線：海底地形、図中のハッチがマングローブ林帯を意味する）

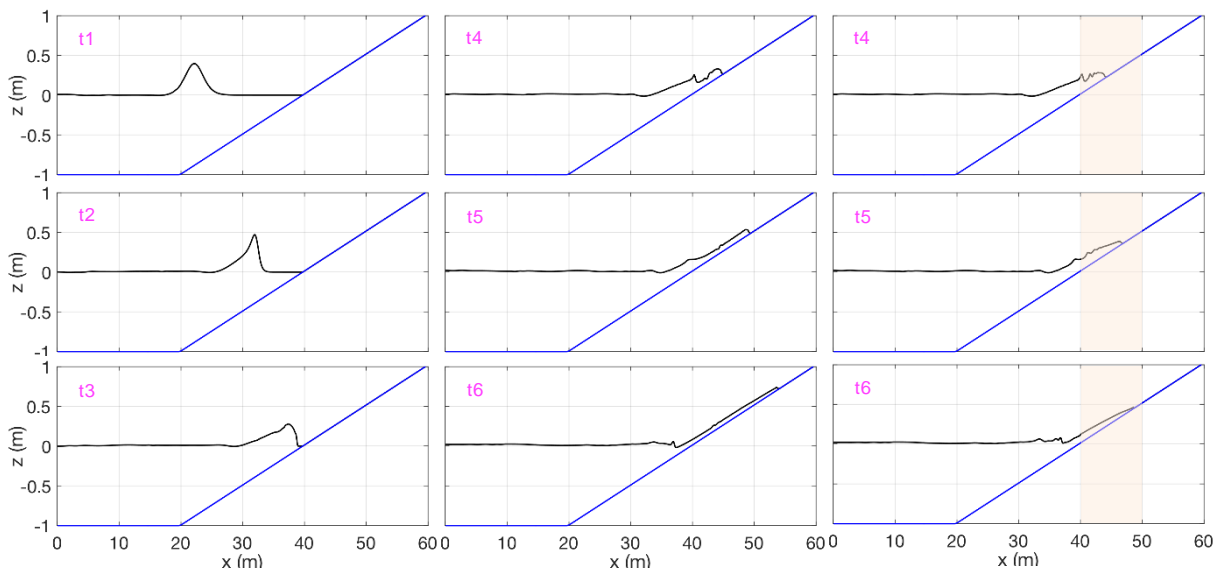


図4.1.13 孤立波を対象とした波浪変形計算結果：水深 $h=0.86\text{m}$ 、波長 $L=7.7\text{ m}$ （左：遡上前、中：マングローブ林なし、右：マングローブ林有、黒実線：水面変位、青実線：海底地形、図中のハッチがマングローブ林帯を意味する）

5. 本研究により得られた成果

気候変動の影響を考慮して台風発達から沿岸数kmまでの高潮・高波ハザードを評価可能な大気・海洋・波浪結合モデルを開発した。さらに極浅海におけるマングローブの効果を評価可能とする高解像

度波動モデルを開発し、沖合から氾濫まで対応可能なハザード・適応策評価のモデルを構築した。

(1) 科学的意義

気候変動に伴う沿岸災害減災のため、マングローブのグリーンインフラの効果を考慮した台風から高潮・高波の遡上までを考慮した評価モデルを開発した。第1に、適応策のために重要となる領域・地域レベルでの沿岸ハザード評価のために気候変動の影響を考慮して台風発達から沿岸数kmまでの高潮・高波ハザードを評価可能な大気・高潮・波浪結合モデルを開発した。まず大気海洋間の運動量交換に対して、波浪の影響を陽に考慮可能とし、さらに将来の気候条件を考慮できる疑似温暖化実験を結合モデルで実行可能とした。これに加えて沿岸ハザードの強度を他の地域で評価できるように、過去イベントをベースに台風経路を任意に設定できる地形シフト計算法を開発した。これにより、過去のイベントをもとに、任意の地域来襲する温暖化を考慮した台風イベント評価が可能となった。

マングローブ林により、外洋から陸上に来襲する高潮や波浪の減衰効果を定量的に評価するため、空間解像度10mの高解像度波動モデルを開発した。マングローブ林の効果を抗力・慣性力で評価可能とし、モデル上で、マクロ的にマングローブの樹形をパラメタライズし、樹齢や樹高に依存するマングローブ樹形の多様性を考慮して波浪の減衰効果を定量的に評価可能とした。

これら2つのモデルを組み合わせることにより、ハザードの強さの評価からマングローブ林の持つ沿岸災害の減災効果を定量的に評価可能とした。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

IPCC第5次評価報告書（AR5）WGIIにおいても、熱帯低気圧の将来変化が生じた場合の災害リスクの増大の可能性が指摘されているが、特定地域における高潮・高波の変化についての予測の不確実性は大きく、特に高潮の将来変化予測の確信度は低いことが明記されている。本研究成果は、アジア太平洋の台風来襲地帯における、熱帯低気圧による沿岸ハザードの将来変化特性を定量的にまとめたものであり、環境省が進めているアジア太平洋域の温暖化影響評価・適応策に貢献できる科学的データを得ている。

また、マングローブが持つ沿岸ハザードの軽減効果としてのグリーンインフラストラクチャ（グリーンインフラ）としての役割の定量化を行った。マングローブの減災効果を定量化できる数値モデルは、アジア太平洋域における適応策推進における強力な科学ツールであり、環境省およびJICA等が進めているアジア太平洋域におけるグリーンインフラ戦略に貢献できる。

これらの成果は、今後のIPCCのAssessment Report掲載に向けてまとめられるだけでなく、Green Climate Fund等の国際基金への貢献も期待できる。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) Green infrastructures for coastal protection, Professor Pengzhi Lin, Sichuan University, 中国, 四川大学共同研究費等を通じて連携, マングローブ林による波浪減衰についての実験データおよび現地観測データの比較を開始.

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 有吉望, 森 信人 (2018) 北西太平洋の台風の最大潜在強度を用いた 3 大湾における高潮偏差

の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_619-I_624.

- 2) Mori, N., T. Shimura, K. Yoshida, R. Mizuta, Y. Okada, M. Fujita, T. Khujanazarov and E. Nakakita (2019) Future changes in extreme storm surges based on mega-ensemble projection using 60-km resolution atmospheric global circulation model. Coastal Engineering Journal, 1-13.
- 3) Chang, C.W, N. Mori, N. Tsuruta, K. Suzuki (2019) Estimation of Wave Force Coefficients on Mangrove Models, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.75/2, p. I_1105-I_1110.
- 4) Chang, C.W, N. Mori, N. Tsuruta, K. Suzuki (2019) Application of Boussinesq Modeling on Water Waves through Mangroves, 土木学会論文集B2(海岸工学), 投稿中
- 5) 二宮順一, 森 信人, 竹見哲也 (2020) 台風Haiyanの高解像度計算における海洋・波浪の感度, 土木学会論文集B2(海岸工学), 投稿中

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) Chang, C.W., N. Mori (2019) Engineering Functional Evaluation of Mangrove Forests for Coastal Disaster Reduction, Hydrolink (Magazine), Number 4, pp.110-113.

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Mori, N., D. Urano, T. Shimura and R. Mizuta (2018) Impact of SST cooling on tropical cyclone in AGCM-Slab ocean-wave model, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) annual meeting, Hawaii.
- 2) Che-Wei Chang, Naoki Tsuruta, Kojiro Suzuki, Nobuhito Mori (2018) An experimental study on water waves through model mangrove forests, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) annual meeting, Hawaii.
- 3) Mori, N., R. Kishimoto and T. Shimura (2018) Wave climate variability and related climate indices, 36th International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2018), ASCE, Baltimore.
- 4) Chang, C.W. and P. Liu (2018) Harmonic generation in coastal forest, 36th International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2018), ASCE, Baltimore.
- 5) Chang, C.W, N. Mori, N. Tsuruta, K. Suzuki (2019) On the Interactions between Water Waves and Mangrove Trees: Physical Modeling in Two Scales, AOGS2019, Singapore, 2019/7.
- 6) Mori, N., M. Takagi, J. Ninomiya, T. Shimura (2019) Revised parameterization of wave induced turbulent kinetic energy for upper ocean surface mixing, 2nd International Workshop on Waves, Storm Surges, and Coastal Hazards 16th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Melbourne, 2019/11.
- 7) Ninomiya, J., N. Mori, T. Takemi (2019) Impact of estimation methods of drag coefficient at sea surface on typhoon Haiyan using high-resolution air-sea-wave coupled model, 2nd International Workshop on Waves, Storm Surges, and Coastal Hazards 16th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Melbourne, 2019/11.
- 8) Chang, C.W, N. Mori, N. Tsuruta, K. Suzuki (2019) Estimation of Wave Force Coefficients on Mangrove Models, 海岸工学講演会, 2019/10, 鹿児島市.

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) ウェブサイトによる情報発信, <http://www.greeninfra.asia/>
- 2) 森信人, 志村智也, 京都大学アカデミックデイ2018 (2018/9/22, 参加者437名)
<http://research.kyoto-u.ac.jp/academic-day/>
- 3) 森信人, 12/9 マングローブ学会公開シンポジウム (2018/12/9, 参加者約50名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 3) 「グリーンインフラを用いた減災効果を検証・評価する「沿岸災害シミュレーションシステム」の研究開発を開始」, NEC記者発表, 2017年7月7日
- 4) 毎日新聞 (2018年6月, 全国版, 「マングローブ実験」)
- 5) 共同通信 (2019年1月, 「海の森沿岸災害を防ぐ」)
- 6) 日経 xTECH/日経コンストラクション (2019年3月, 「期待の新インフラ「樹木」、減災評価手法の確立へ」)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-2 HPC技術適用によるシミュレーションモデルの高度化

日本電気株式会社

第一官公ソリューション事業部

撫佐 昭裕

平 陽介

坂倉 耕太

後藤 浩二

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：13,931千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：4,863千円、平成30年度：4,534千円、令和元年度：4,534千円）

【要旨】

本サブテーマでは、スーパーコンピュータを用いて、台風による沿岸部の高潮・高波を高解像度で再現するシミュレーションモデルを開発した。シミュレーションモデルには、大気、海洋、波浪を連携したCoupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport Modeling System (COAWST)を採用した。スーパーコンピュータは、国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）が運用する「地球シミュレータ」を使用した。2013年にフィリピンにおいて甚大な被害をもたらした台風Haiyanを対象とし、その発達過程から上陸までの5日間の挙動を「地球シミュレータ」353ノードを用いて、約22時間で再現が可能となった。また、開発した本モデルを用いて、計算スキームや水平解像度などの台風の再現性に対する感度実験を行った。さらに、感度実験から得られた知見をもとに、台風の再現性の良い計算スキーム・水平解像度を選択したモデルを用いて、Haiyan級の大型台風がフィリピンの他地域へ上陸するケースを、仮想地形実験により評価した。標高・海底地形・海陸マスクなどのデータを1度刻みで南北にずらした8種類の地形データを作成し、台風の進路を疑似的に変化させるシミュレーションを行った結果、台風の強度、上陸時間と地形の相関に関して妥当性を確認できた。

【キーワード】

大気・海洋・波浪結合モデルCOAWST、台風Haiyanの再現、感度実験、仮想地形実験、地球シミュレータ

1. はじめに

コンピュータシミュレーションは、科学研究において「理論」「実験」に次ぐ第三の柱「計算科学」の一分野として確立され¹⁾、また、物理学や化学などの自然科学分野から工業・技術分野だけでなく、地球環境分野においても大きな役割を担っている²⁾。そのコンピュータシミュレーションを支えているのが、スーパーコンピュータとその高速化技術からなるHPC (High Performance Computing)技術である。地球環境分野においては、地球規模の複雑な諸現象を忠実に再現し、地球変動予測を実現するために、2002年から「地球シミュレータ」が稼働した³⁾。そして、「地球シミュレータ」において、世界で初めて全球大気大循環シミュレーションで26TFLOPSの高性能シミュレーションを達成して「ゴードン・ベル賞」を受賞した³⁾。またIPCCの第4次報告においては、それまで不可能であった大気100kmと海洋10kmの格子を用いた大気海洋結合モデルの計算を数ヶ月で完了させている²⁾。以後、「地球シミュレータ」や「京」コンピュータなどのスーパーコンピュータは、IPCCの報告書を含めて様々な地球環境問題のシミュレーションに活用されている。それは、HPC技術の進展によってコンピュータシミュレーションの高速実行が可能となり、今まで解くことができなかつた問題を解くことができるようになったからである⁴⁾。

また、近年、日本を初め世界各地において台風による被害が続いている。台風Haiyanは日本気象庁の解析によると最低気圧895hPa、最大風速65m/sと非常に強い台風であった。この台風によって、800百万ド

ルを超える経済的な損失だけでなく、3万人以上の死傷者・行方不明者という非常に大きな人的被害があったことが報告されている⁵⁾⁶⁾。地球温暖化に伴い、今後、台風はより強力となり、災害の規模の拡大が懸念されている⁷⁾。今後の環境政策や防災計画の立案には、地球温暖化の影響を加味した被害予測を行うと共に効果的な防御策の検討が必要となる。本サブテーマではコンピュータシミュレーションを用いて台風による沿岸部の高潮・高波を高解像度で再現するシミュレーションモデルを開発する。

本研究では、シミュレーションモデルとして大気、海洋、波浪を連携したシミュレーションができる Coupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport Modeling System (COAWST)⁸⁾を採用した。COAWSTはUnited States Geological Surveyが開発したモデルであり、大気モデル：Weather Research and Forecasting model (WRF)⁹⁾、海洋モデル：Regional Ocean Modeling System model (ROMS)¹⁰⁾、波浪モデル：Simulating WAVes Nearshore model (SWAN)¹¹⁾からなる。図1.2.1に示したように各モデルは相互に影響を及ぼす物理量を交換しながらシミュレーションを行うものであり、大気モデルと海洋モデルに温暖化を考慮したデータを使用することによって、温暖化の影響を受けた高潮・高波のシミュレーションを行うこともできる。

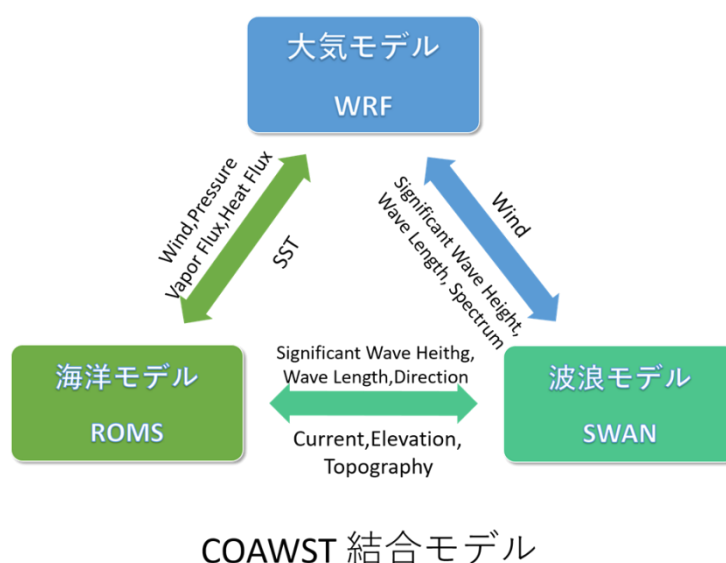


図1.2.1 COAWSTにおけるモデル間の相互作業の概念図

COAWSTは様々なコンピュータ環境で実行できるようにFortran言語で開発されている。高解像度の高潮・高波現象をシミュレーションするためには最低限数kmの格子サイズでシミュレーションを行う必要がある。このシミュレーションを実行するには、研究室レベルのコンピュータ環境では1ケースに1年以上かかることになる。また、スーパーコンピュータで実行した場合でも、シミュレーションプログラムがそのスーパーコンピュータに適した構造を持っていないと高速には実行できない。そこで、本サブテーマではHPC技術である高速化手法を用いて、高解像度の高潮・高波現象を1ケース1日でシミュレーションを実現できるモデルの開発を目指した。

スーパーコンピュータには様々なCPUが採用されており、主なCPUとしてIntel Xeon、Intel Xeon Phi、NVIDIA GPU、富士通SPARC、NEC SXなどある。これらCPUにはそれぞれ特徴があり、その特徴に合わせた高速化技術が研究開発されている。本サブテーマは、地球変動予測を実現するために開発された「地球シミュレータ」と同じ特徴を持つスーパーコンピュータSX-ACE上で高速に実行できるモデルを開発することにした。しかし、開発にあたっては、近年のCPUで採用されているSingle Instruction stream, Multiple Data stream (SIMD) 方式（ベクトル処理）¹²⁾とMessage Passing Interface¹²⁾による並列化方式での高速化を中心に行い、他のスーパーコンピュータでも高速化できるように配慮を行った。

大気や海洋では様々な物理現象や化学反応を伴っている。このすべての物理現象や化学反応を、現実

的な計算時間内にシミュレーションすることは不可能である。そこで、大気モデルや海洋モデルでは、その現象の特徴を表現するようなパラメタリゼーションが行われている。現象のパラメタリゼーションは、同じ現象に対しても、いくつかの解法（計算スキーム）がある。例えば、大気モデルWRFには、積雲などの雲現象の計算スキームとして10個以上のスキームが実装されている。この解法によって、精度良く計算できる範囲が異なってくる。本研究では、2013年にフィリピンに上陸した台風Haiyanを対象に、台風の再現性に対するいくつかの計算スキームの感度実験を行った。いくつかの感度実験の結果から、再現性の高い計算スキームを選択し、仮想地形実験を行った。仮想地形実験とは、様々な経路で台風Haiyanがフィリピンに上陸した場合をシミュレーションするため、標高・海底地形・海陸マスクのデータを-2度から+5度まで1度刻みで南北にずらしたシミュレーションである。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、大気・海洋・波浪の物理現象について、シミュレーションによる定量評価を効率的に行うため、サブテーマ(1)の結合モデルをスーパーコンピュータに実装し、プログラムの演算特性を解析する。サブテーマ(1)とモデル開発を進め、演算性能の向上と結合モデルの高速化を行う。社会実装に向けた高速化版結合モデルの整備を行う。

開発にあたっては、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」をターゲットとして、United States Geological Surveyが開発した大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを用いてSIMD化、並列化を行い、COAWSTのロジック変更を行わないものとする。また、大気モデルWRFについては、COAWSTよりも高解像度モデルを開発する。高解像度の大気モデルWRFの開発は、台風の再現性へ水平解像度の影響を確認することが1つ目的である。また、台風の発達過程の解析のため、個々の積乱雲を解像できる程の高解像度シミュレーションを行うためである（このモデルを高解像度大気モデルWRFと記載する）。

開発目標としては、2013年の台風Haiyanの発達過程からフィリピン上陸までの2013年11月5日から10日までの物理現象を再現できるようにすることである。シミュレーションの解像度と格子数は大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTでは表2.2.1、高解像度大気モデルWRFでは表2.2.2の通りである。

表2.2.1 各モデルの解像度と格子数

モデル	解像度	格子数
大気モデルWRF	領域1 3km	領域1 1334×667
	領域2 1km	領域2 2001×705
海洋モデルROMS	3km	1334×667
波浪モデルSWAN	3km	1334×667

表2.2.2 高解像度大気モデルWRFの解像度と格子数

モデル	解像度	格子数
高解像度大気モデルWRF	領域1 3km	領域1 1334×667
	領域2 1km	領域2 2001×705
	領域3 333m	領域3 6004×2503
海洋モデルROMS	3km	1334×667
波浪モデルSWAN	3km	1334×667

開発するモデルは、「地球シミュレータ」512ノードを利用して表2.2.1の解像度と格子サイズのCOAWSTを24時間以内にシミュレーションできることを目標とする。なお、「地球シミュレータ」の性能等の諸元は表2.2.3の通りである。

表2.2.3 地球シミュレータの諸元

	項目	値
ノード	CPU数	1
	コア数	4
	CPU性能	64 GFLOPS
	メモリ容量	64 GB
システム	ノード数	5120
	CPU数	5120
	コア数	20480
	CPU性能	1.3 PFLOPS
	メモリ容量	320 TB

3. 研究開発方法

本サブテーマでは、大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを「地球シミュレータ」で高速に実行するためのモデル開発を行う。また、開発したモデルを用いて過去の台風(2013年の台風Haiyan)の再現シミュレーションを行い、観測結果と比較することで、開発モデルの台風現象の再現性を確認する。さらに、大気モデルの物理スキーム・水平解像度および海洋表層の条件による台風現象の再現性に対する影響を調査するための感度実験を行う。最後に、非常に強い台風が、様々な地域に上陸した場合の台風による高潮・高波を評価するため、大気モデルの初期値・境界値は変更せず、標高・海底地形・海陸マスクのデータを南北にずらしたシミュレーション(仮想地形実験)を行う。研究開発方法として、以下に、モデル開発、感度実験、仮想地形実験について記載する。

(1) モデル開発

大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTのモデル開発は「地球シミュレータ」をターゲットとして行う。図3.2.1は「地球シミュレータ」の構成図である。「地球シミュレータ」はVector Processing Unit(VPU)と呼ばれるベクトル処理機構を有しており、この処理機構を活用することによってプログラムの高速化を実現している。本高速化では、このベクトル処理機構を効率的に利用できるモデルを開発する。

HPC技術にはベクトル処理の性能指標としてベクトル化率とベクトル長がある。ベクトル化率は、プログラムの処理において何パーセントの処理がベクトル処理機構を利用できるかを示す指標である。この指標が高いほど高速にプログラムが実行できる。ベクトル長はベクトル処理を行うD0ループの長さであり、長いほどメモリレイテンシを隠蔽でき実行時間を短縮できる。これらの指標を用いてモデルの開発を行っていく。

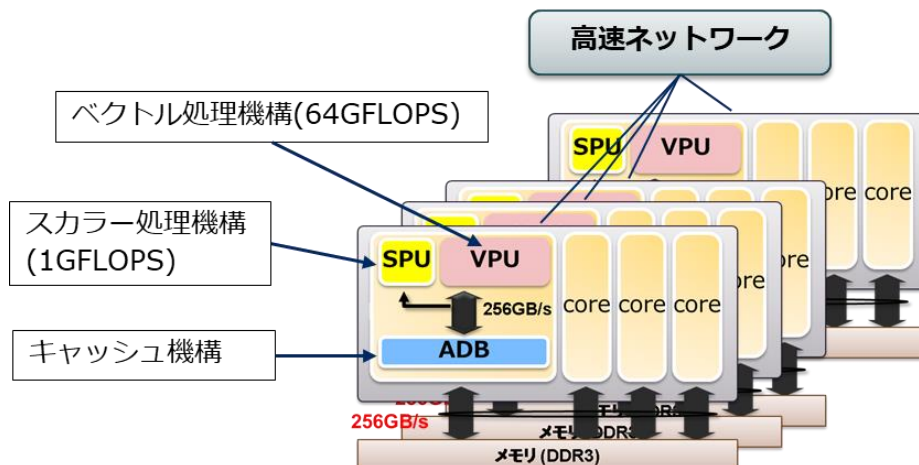


図3.2.1 「地球シミュレータ」のCPUアーキテクチャ図

ベクトル処理にあたっては、図3.2.2に示した流れで開発を実施する。「性能分析 HOTSPOTの特定」では、「地球シミュレータ」に実装されている性能解析ツールproginfとftrace¹³⁾を使用して高コストルーチンを特定し、そのルーチンの性能指標を求める。「高速化施策の適用」においては、特定したルーチンに対してベクトル化率とベクトル長を拡大するための高速化手法を検討・開発して実装を行う。「動作検証」では、新たに実装したモデルを用いてシミュレーション結果が正しいか検証を行う。「性能測定」では、高速化の効果についてproginfとftraceを用いて確認を行う。効果がない場合にはその原因を調査し、再度、図3.2.2の流れで開発を行う。

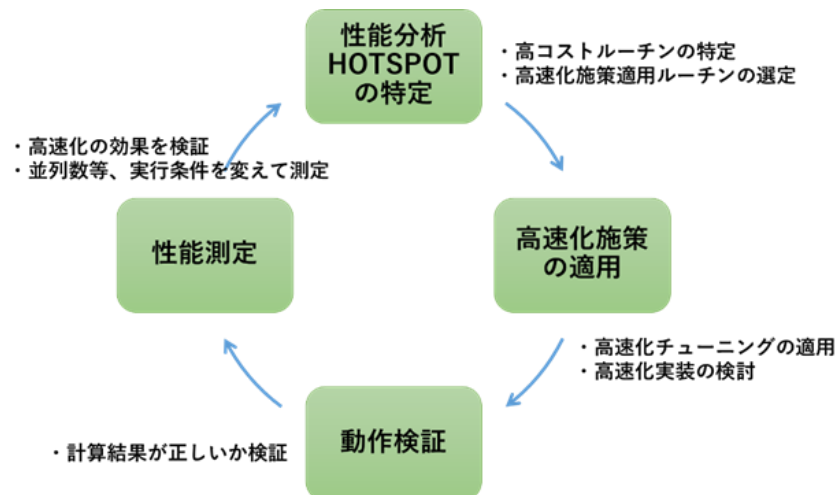


図3.2.2 高速化の流れ

並列処理には性能指標として並列化率がある。これはプログラムの何パーセントが並列に実行できるかをあらわすものである。大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTは、Multiple Program Multiple Data (MPMD)方式で実装されており、大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを構成する大気モデルWRF、海洋モデルROMSおよび波浪モデルSWANの各モデルコンポーネントは、それぞれMPIを用いた並列化がなされている。並列処理における高速化のためには、各モデルコンポーネントの並列化率の改善はもちろん必要だが、大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTとしての並列化率を改善することが重要となる。そのためには、各モデルコンポーネントの計算負荷(ロードバランス)を均等にする必要がある。並列処理についても図3.2.2の流れに従って開発を行っていく。並列処理における「性能分析 HOTSPOTの特定」では、任意の並列数での各プロセスの処理時間を解析する。「高速化施策の適用」においては、処理時間が減少するように負荷バランスの調整を検討して、実装を行う。「動作検証」と「性能測定」はベクトル処理と同様である。

(2) 感度実験

本角実験では、(1)で開発したモデルを用いて現在気候における台風を対象にシミュレーションを行い、その妥当性・再現性を確認する。具体的には、2013年にフィリピンへ上陸した台風Haiyanの再現実験を行う。台風Haiyanの経路、最低気圧及び最大風速の時間変化を図3.2.3に示す。

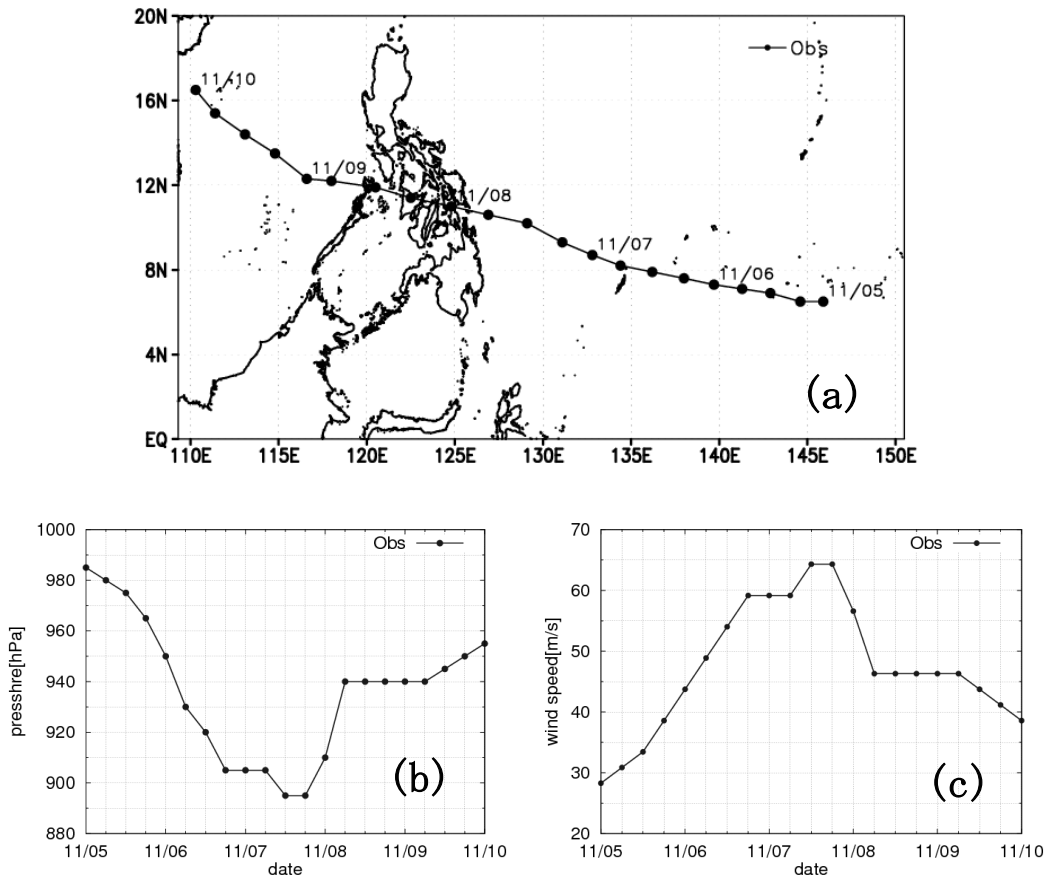


図 3.2.3 台風Haiyanの(a)経路, (b)最低気圧及び(c)最大風速

台風Haiyanは、フィリピンに上陸した台風としては最も勢力が強かった。地球温暖化時に想定される強大な台風の再現性を確認するためにも、非常に強い台風Haiyanを対象に再現性を確認する。台風の強度を再現するには、台風の目を表現できる解像度が必要である。台風の目はおよそ20km程度のため、モデルの水平解像度は3kmと設定した。台風Haiyanの経路(図3.2.3 (a))をカバーするように計算領域(図3.2.4参照)を設定した。台風の発達過程の再現のため、大気モデルには、さらに水平解像度1kmの領域2(図3.2.4参照)のネスト格子も設定した。

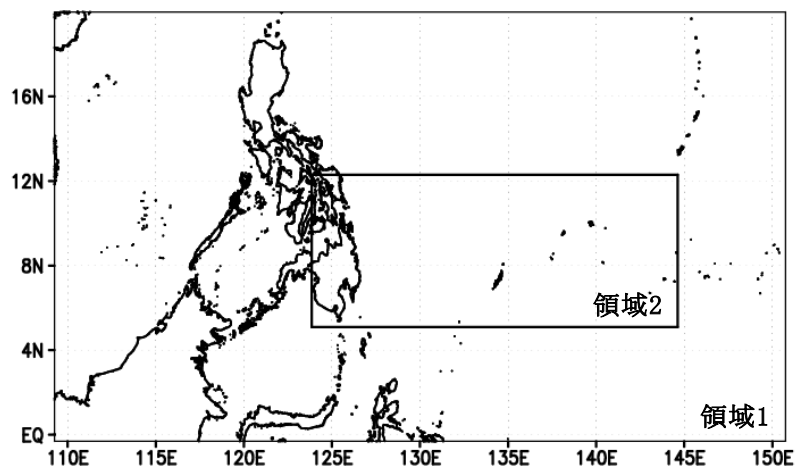


図 3.2.4 台風Haiyanの再現シミュレーションの計算領域設定

大気と海洋・波浪間の相互作用による台風の発達過程に対する影響を調べるため、計算スキーム・海洋表層の条件等に対する感度実験を行う。感度実験において主に使用したモデルパラメータを表 3.2.1 に示す。感度実験としては、大気モデルWRFのみで地表面フラックスによる感度を調べる。感度実験に使用した地表面フラックススキームを表 3.2.2 に示す。また、大気と海洋・波浪間の相互作用の効果を確認するため、大気モデルWRFのみを用いた再現シミュレーションの結果と大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを用いた再現シミュレーションの結果を比較する。さらに、海洋混合層の状況による台風の発達過程への影響を調べるため、表 3.2.3 に示す感度実験を行う。

表 3.2.1 COAWSTのモデルパラメータ

大気モデル (WRF)			
項目名	値	項目名	値
水平解像度	領域1:3km 領域2:1km	地表面フラックス (sf_sfclay_physics)	Monin-Obukhov-Janjic scheme
水平格子数	領域1: 1334x667 領域2: 2002x703	大気境界層 (bl_pbl_physics)	Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme
鉛直層数	55層	陸面 (sf_surface_physics)	thermal diffusion scheme
雲微物理 (mp_physics)	Lin et al. scheme	初期値・境界値データ	NCEP Final Analysis
短波放射 (ra_sw_physics)	Dudhia scheme	地形データ	GTOP030
長波放射 (ra_lw_physics)	RRTM scheme		
海洋モデル (ROMS)			
項目名	値	項目名	値
水平解像度	領域1:3km	初期値・境界値データ	SODA3.4.1 1/4deg 5day
水平格子数	領域1:1334x667	海底地形データ	GEBCO
鉛直層数	40層		
波浪モデル (SWAN)			
項目名	値	項目名	値
水平解像度	領域1: 3km	浅海砕波	GEN3
水平格子数	領域1: 1334x667	4波共鳴相互作用	GEN3
方位分割数	36	3波共鳴相互作用	GEN3
周波数分割数	24	波の指数関数的発達	KOMEN
波の線形的発達	GEN3	伝播(移流)(PROP)	BSBT
白波砕波	GEN3	初期値・境界値データ	初期値: computed from local wind, 境界値: NOAA WWIII Global 30 min.
海底摩擦	GEN3	海底地形データ	GEBCO

表 3.2.2 地表面フラックススキームの感度実験

実験No.	地表面フラックス(sf_sfclay_physics)	記号
1	Monin-Obukhov Similarity scheme (1)	sfclay=1
2	Monin-Obukhov-Janjic scheme (2)	sfclay=2

表 3.2.3 海洋混合層深さに関する感度実験

実験No.	海洋混合層深さ	記号
1	大きく減らしたケース	mld6300
2	平年程度に減らしたケース	mld8300
3	台風Haiyanの発生時のケース	COAWST

さらに、水平解像度による影響を調べるため、大気モデルWRFのみを使用した台風Haiyanの高解像度再現シミュレーションを行った。高解像度再現シミュレーションの計算領域と各領域の水平解像度及び水平格子数をそれぞれ図3.2.5及び表3.2.4に示す。表3.2.4における2領域の再現シミュレーションの計算領域は大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを用いた再現シミュレーションと同じ設定である(図3.2.4参照)。大気モデルWRFのみで再現シミュレーションを行う場合、海面での境界条件として海面温度が必要となる。海面温度には日本気象庁のMerged satellite and in situ data Global Daily Sea Surface Temperatures in the global ocean(MGDSST)を使用した。

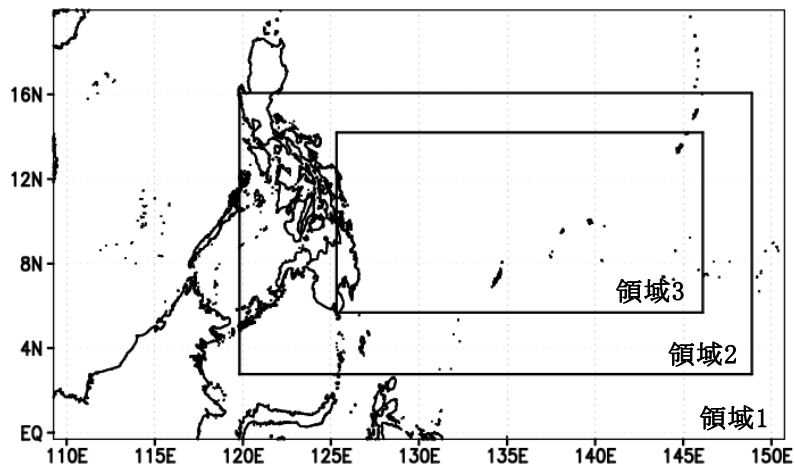


図 3.2.5 大気モデルWRFのみを用いた台風Haiyanの再現シミュレーションの計算領域の設定

表 3.2.4 大気モデルWRFのみを用いた台風Haiyan再現シミュレーションにおける各領域の水平解像度と水平格子数

領域	3領域の高解像度 再現シミュレーション		2領域の再現シミュレーション	
	水平解像度dx	水平格子数	水平解像度dx	水平格子数
領域1	3km	1334x667	3km	1334x667
領域2	1km	2803x1303	1km	2002x703
領域3	333m	6004x2503		

(3) 仮想地形実験

2013年の台風Haiyan級の非常に強い台風がフィリピンの他地域へ上陸した場合を仮定した実験は、他地域における極端な沿岸災害の評価のため重要である。このような評価のため、標高・海底地形・海陸マスクなどのデータを-2度から+5度まで1度刻みで南北にずらした8種類の地形データを作成し、Haiyan級の台風が他地域へ上陸した場合のシミュレーションを行う。これらの地形データの作成には、大気モデルWRFの前処理システムWPSの中のプログラム(geogrid)を改造し、使用した。これらの地形データに合わせて大気モデルWRF及び海洋モデルROMSの初期値・境界値をそれぞれ作成し、数値実験を実行する。仮

想地形実験で使用した8種類の標高データを図 3.2.6に示す。

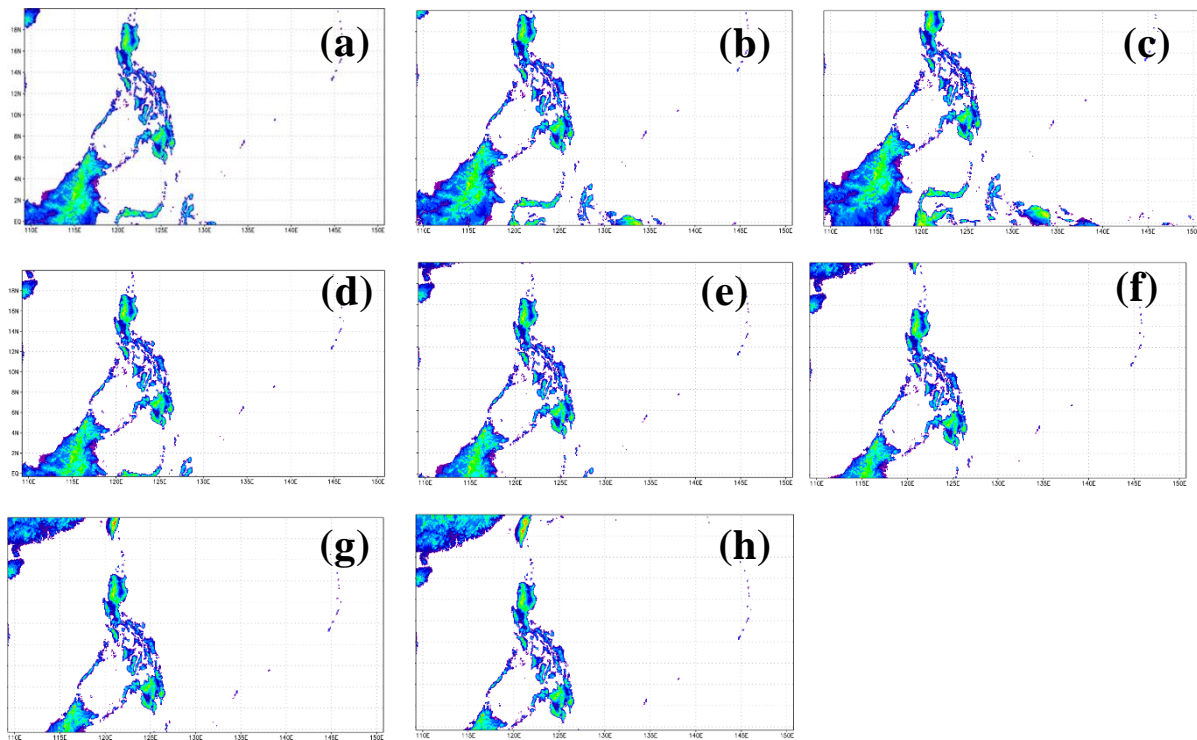


図 3.2.6 仮想地形実験で使用した8種類の標高データ

4. 結果及び考察

大気・海洋・波浪の物理現象について、シミュレーションによる定量評価を効率的に行うため、サブテーマ(1)の結合モデルをスーパーコンピュータに実装し、プログラムの演算特性を解析した。サブテーマ(1)とモデル開発を進め、演算性能の向上と結合モデルの高速化を行った。社会実装に向けた高速化版結合モデルの整備について、ベクトル型および並列型コンピュータ両者について行った。計画通りの成果を得た。

(1) モデル開発

大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTの高速化は「地球シミュレータ」をターゲットとして、ベクトル処理と並列処理に対して行った。

ベクトル処理において性能分析を行った結果を表4.2.1に示す。ベクトル化率については、一般に90%以上が高速化の目安になっているが¹⁴⁾、大気モデルWRFと波浪モデルSWANが90%に達していない。また、ベクトル長は一般に交叉ループ長⁴⁾以上の長さが必要で、長いほどメモリレイテンシを隠蔽することができる。各モデルともベクトル長が80以上あるので、今回の開発ではベクトル化率の向上をターゲットとした。ここで高速化を対象とした高コストルーチンを表4.2.2に示す。

表4.2.1 COAWSTの性能指標

	ベクトル化率	ベクトル長
大気モデルWRF	80 %	86
海洋モデルROMS	98 %	92
波浪モデルSWAN	82 %	132

表4.2.2 高コストルーチン

モデル名	ルーチン名
大気モデルWRF	clphyld, advect_scalar_pd, w_damp,

	in_use_for_config
海洋モデルROMS	gls_corstep_tile
波浪モデルSWAN	swnl3, adddis, awpsel, strsd, strsx, sintgrl, sprosd, swcap, ssurf, rescale, filnl3, swind3, philim

ベクトル化率向上にあたって適用を検討した高速化手法を表4.2.3に示す¹⁵⁾。これらの手法において高コストルーチンについて実装方法と効果を検討した。その結果、図4.2.1に示したように各高コストルーチンの実行時間を短縮することができた。図中の青色の棒グラフが本手法を適用する前の実行時間、赤色が適用後の実行時間である。ここで、ルーチン名の下に記載した[数値]は表4.2.3の項番の手法を適用したことを示している。実行時間を42%から最大99%まで短縮できたことがわかる。また、本高速化による各モデルのベクトル化率とベクトル長を表4.2.4に、実行時間を図4.2.2に示した。各モデルともベクトル化率が向上し、90%以上を達成している。また、各モデルの実行時間は図4.2.2のように最大67%短縮されている。

表4.2.3 高速化手法

項番	手法名
1	データ依存関係の除去
2	演算doループからのI/O文の除去
3	演算doループからのサブルーチン呼び出しの除去
4	ループ入れ替え
5	ループ融合
6	if分岐の最適化
7	メモリフットプリントの制御

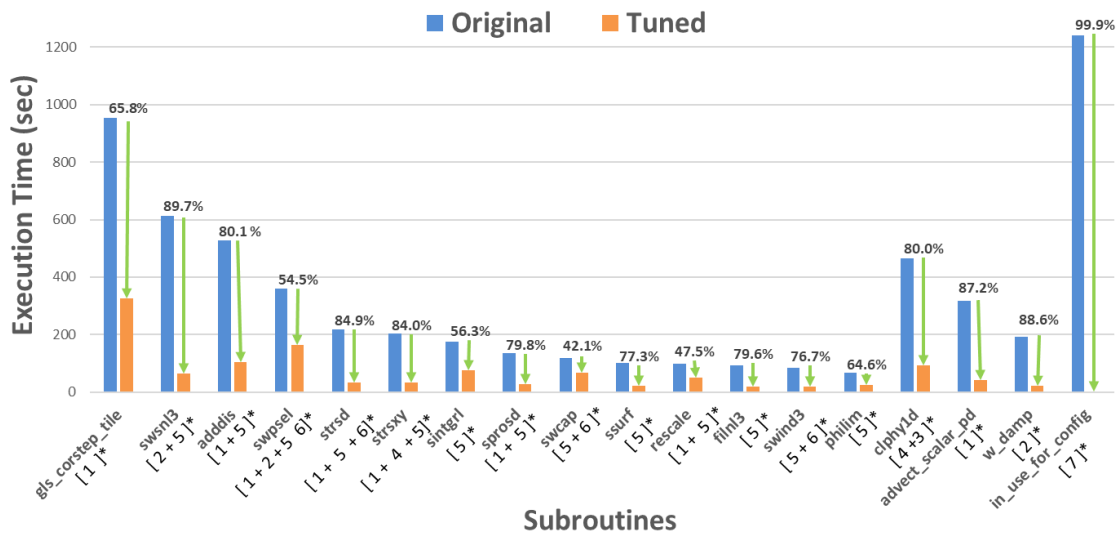


図4.2.1 高速化手法による実行時間の変化

表4.2.4 高速化手法に適用後のCOAWSTの性能指標

	ベクトル化率	ベクトル長
大気モデルWRF	96 %	75
海洋モデルROMS	99 %	173
波浪モデルSWAN	94 %	127

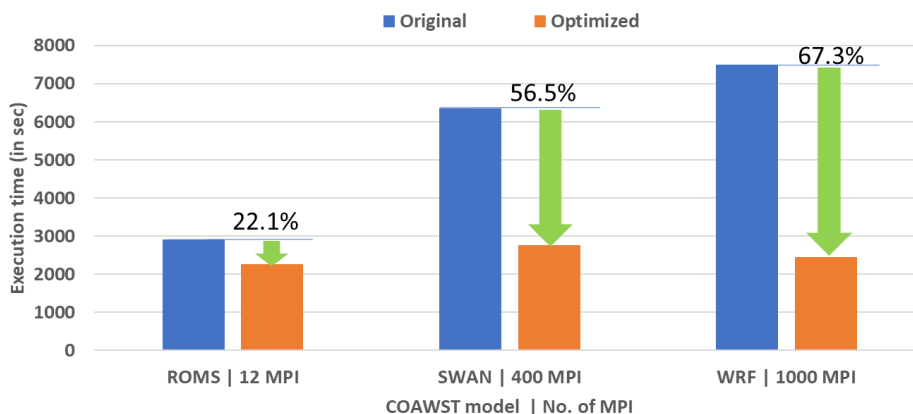


図4.2.2 COAWSTの実行時間

並列処理における高速化としてロードバランスの均一化を行った。性能分析として、大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを並列実行したときの各モデルの処理時間を調査した。ロードバランスが悪い場合にはアイドル時間が長くなり性能が低下する。表4.2.5が台風Haiyanの6時間シミュレーションを行ったときの結果であり、各モデルに割り当てたノード数、演算時間、通信時間、アイドル時間を示している。大気モデルWRFにおいて演算時間が最も長く、アイドル時間が最も短くなっている。このことから大気モデルWRFへのノード割り当てが少ないことがわかる。また、波浪モデルSWANも実行時間で海洋モデルROMSより長く、またアイドル時間が海洋モデルROMSより短い。このことから、波浪モデルSWANへのノード割り当てが少ないこともわかる。そこで、各モデルへのノード数の割り当てを変えながら、最も処理時間が短くなるノード割り当てを探索した。その結果が表4.3.6である。ここでは、Haiyanの5日間シミュレーションの実行時間を示した。各モデルとも演算時間とアイドル時間がほぼ同程度の時間になり、ロードバランスの均一化が行えている。

表4.2.5 COAWST 6時間シミュレーションの実行時間

モデル名	ノード数	演算時間	通信時間	アイドル時間
大気モデルWRF	21	26,138 秒	4,101 秒	3,117 秒
海洋モデルROMS	1	5,839 秒	24,400 秒	24,199 秒
波浪モデルSWAN	10	18,465 秒	11,771 秒	11,486 秒

表4.2.6 COAWST 5日間シミュレーションの実行時間

モデル名	ノード数	演算時間	通信時間	アイドル時間
大気モデルWRF	250	2,167 秒	1,797 秒	1,510 秒
海洋モデルROMS	3	2,246 秒	1,720 秒	1,699 秒
波浪モデルSWAN	100	2,718 秒	1,244 秒	1,197 秒

以上より、開発した大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTは、「地球シミュレータ」において表2.2.1の解像度のシミュレーションを表4.2.7のスペックで実行できるようになった。

表4.2.7 COAWSTの「地球シミュレータ」での実行スペック

シミュレーション内容	ノード数	実行時間
Haiyan 5日間シミュレーション	353	22.74時間

(2) 感度実験

台風の発達過程に対する計算スキーム・海洋混合層深さの感度実験を行った。計算時間短縮のため、台風Haiyanの再現シミュレーションは、2013年11月5日 00:00UTCから2013年11月7日 21:00UTCまで約3日積分を行った。

大気モデルWRFのみを用いた台風Haiyan再現シミュレーションによる地表面フラックススキーム感度実験における経路、最低気圧および最大風速を図 4.2. に示す。経路(図 4.2. (a))については、地表面フラックススキームの違いで大きな差は見られない。一方、最低気圧(図 4.2. (b))と最大風速(経路(図 4.2. (c)))には大きな差が見られる。Monin-Obukhov Similarity scheme (sfclay=1)の方が、Monin-Obukhov-Janjic scheme (sfclay=2)よりも最低気圧は高く、最大風速は弱い傾向にある。ここには示さないが、Monin-Obukhov Similarity scheme (sfclay=1)を使用した大気・海洋・波浪結合モデルの場合、さらに最低気圧が高くなり、最大風速も弱くなる。

大気モデルWRFのみと大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを用いた台風Haiyanの再現シミュレーションの経路、最低気圧及び最大風速を図 4.2. に示す。経路(図 4.2. (a))については、大気モデルWRFのみの場合と大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTの場合で、大きな違いは見られない。最低気圧(図 4.2. (b))については、大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTの方が、観測値に近い結果となった。大気モデルWRFのみの場合には、海面温度として、日本気象庁のMGDSSTを使用している。MGDSSTは日毎のデータで、台風通過時の水温低下が再現できていない可能性がある。一方、大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを用いた再現シミュレーションでは、台風通過時に海面水温が下がることを確認している。この海面水温の低下により台風の発達を抑えられた可能性がある。これを確認するため、海洋混合層深さを変えた感度実験を行った。海洋混合層深さ感度実験における経路、最低気圧および最大風速を図 4.2. に示す。海洋混合層の深さは、mld6300、mld8300、COAWST(表 3.2. の記号列参照)に順番で深くなる。海洋混合層深さが深くなると、海洋混合層の下の海面よりも低い温度の海水が海面に現れにくくなることが考えられる。最低気圧(図 4.2. (b))に関しては、海洋混合層深さが深くなるに従い、台風は発達し、最低気圧が下がっており、台風の発達への海面水温の影響があったことが分かる。

最後に、台風発達過程に対する水平解像度の影響を調べるため、表 3.2.4に示した解像度の異なる2つの再現シミュレーションを行った。この2つの再現シミュレーションにおける最低気圧を図 4.2. に示す。図 4.2. から分かるように、台風の発達途中の2013年11月6日から11月7日にかけては、両者に違いが見られ、水平解像度333mの領域3を含む高解像度再現シミュレーションの方が観測値に近い。しかし、台風が最も発達した2013年11月8日には、2つの再現シミュレーションの最低気圧に大きな差は見られなかった。

いくつかの感度実験の結果、地表面フラックススキームとしては、Monin-Obukhov-Janjic scheme (sfclay=2)を使用した大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを用いた再現シミュレーションの最低気圧が観測値に近く、再現性がよかった。水平解像度に関しては、最低気圧・最大風速に与える影響は小さかったため、以降の仮想地形実験では、2領域の再現シミュレーションの設定で行った。

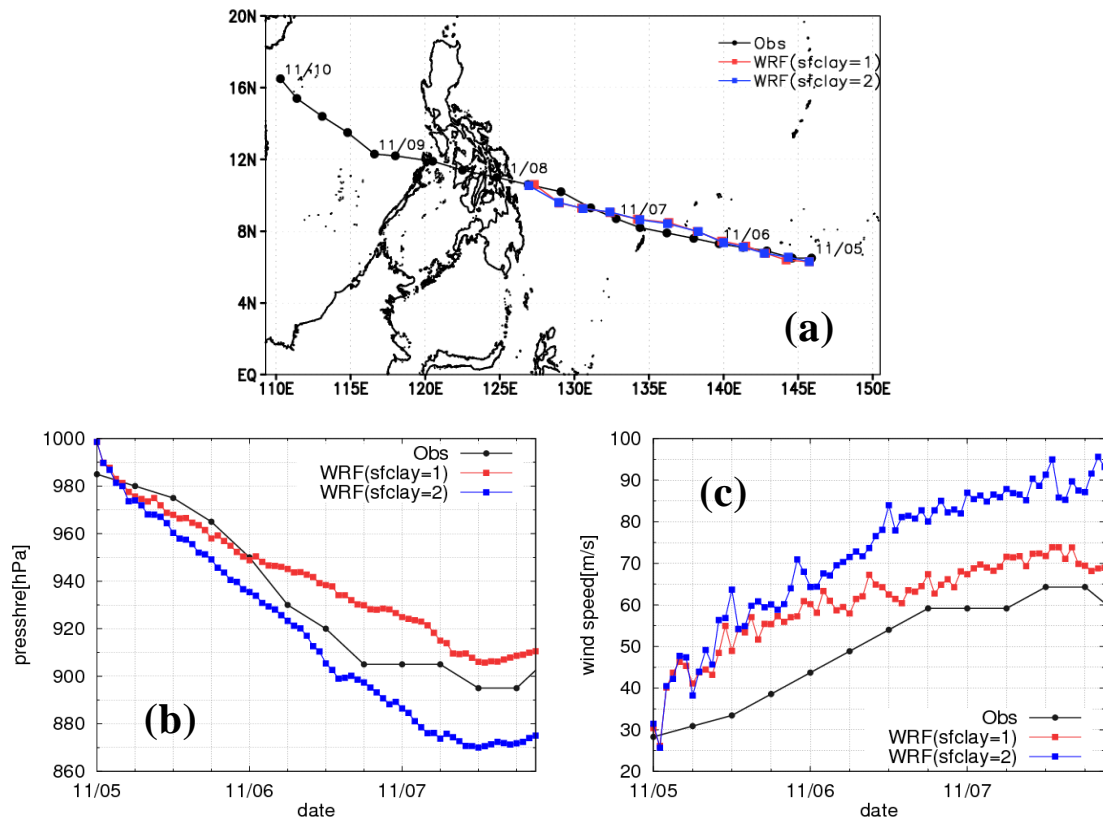


図 4.2.3 大気モデルWRFのみを用いた台風Haiyanの再現シミュレーションによる地表面フラックススキーム感度実験の結果と観測結果(Obs)との比較。(a)経路 (b)最低気圧 (c)最大風速。

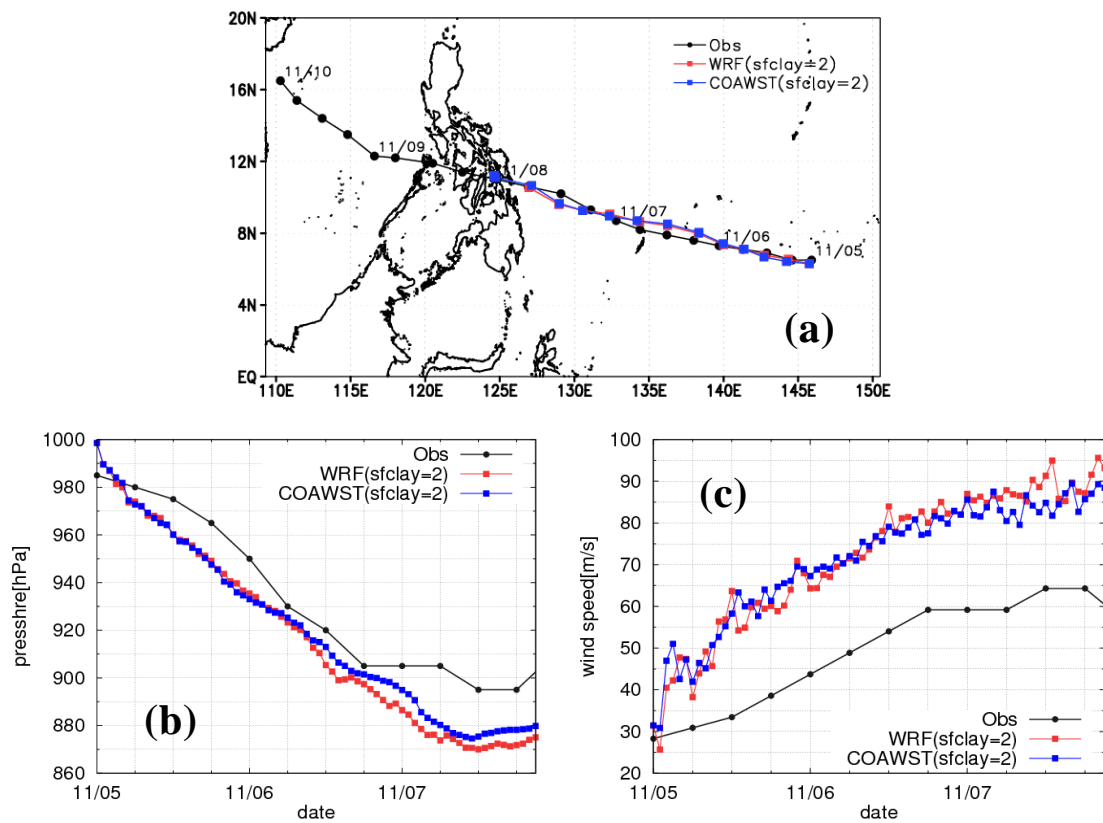


図 4.2.4 大気モデルWRFのみと大気・海洋・波浪結合モデル(COAWST)を用いた台風Haiyanの再現シミュレーションの結果と観測結果(Obs)との比較。(a)経路 (b)最低気圧 (c)最大風速。

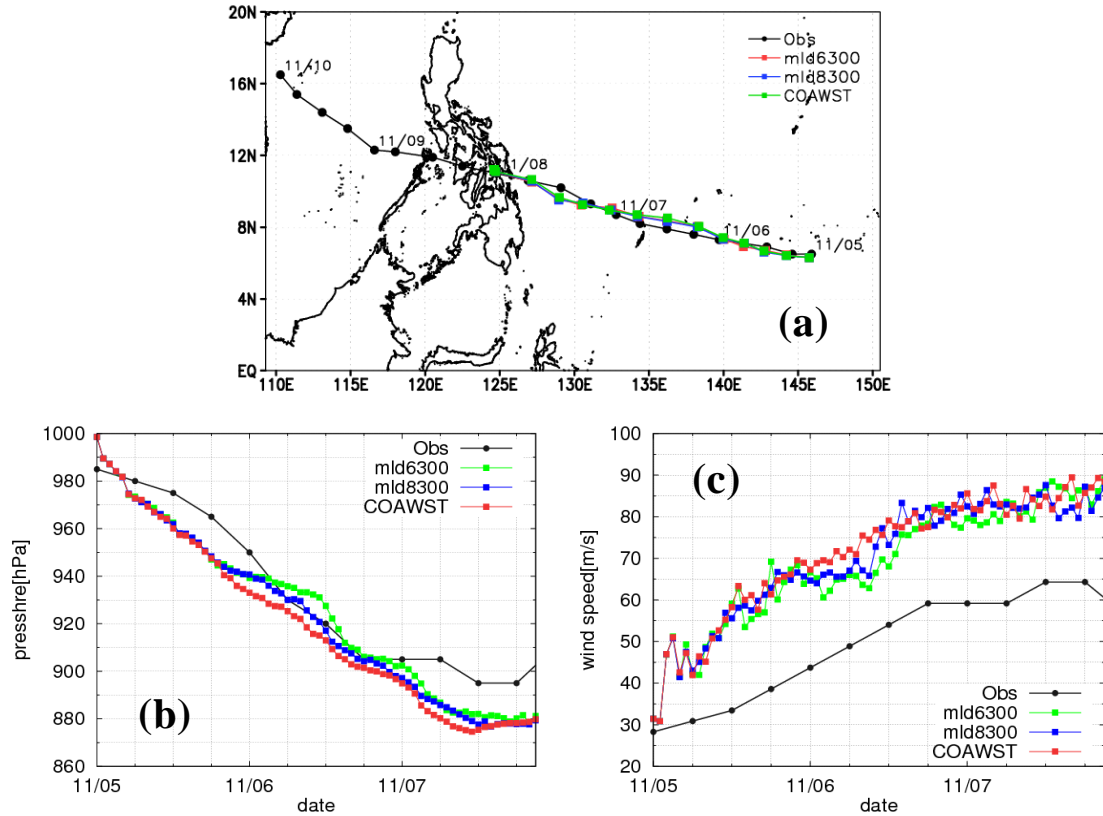


図 4.2.5 大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを用いた台風Haiyanの再現シミュレーションによる海洋混合層深さ感度実験の結果観測結果(Obs)との比較。(a)経路 (b)最低気圧 (c)最大風速。各図の黒線はベストトラック観測データの結果。mld6300は混合層深さを平年値以上に減らした結果。mld8300は混合層深さを平年値程度に減らした結果。COAWSTは台風Haiyanの発生時(2013年11月)の混合層深さの結果(図 4.2.4のCOAWST(sfclay=2)と同じ結果)。

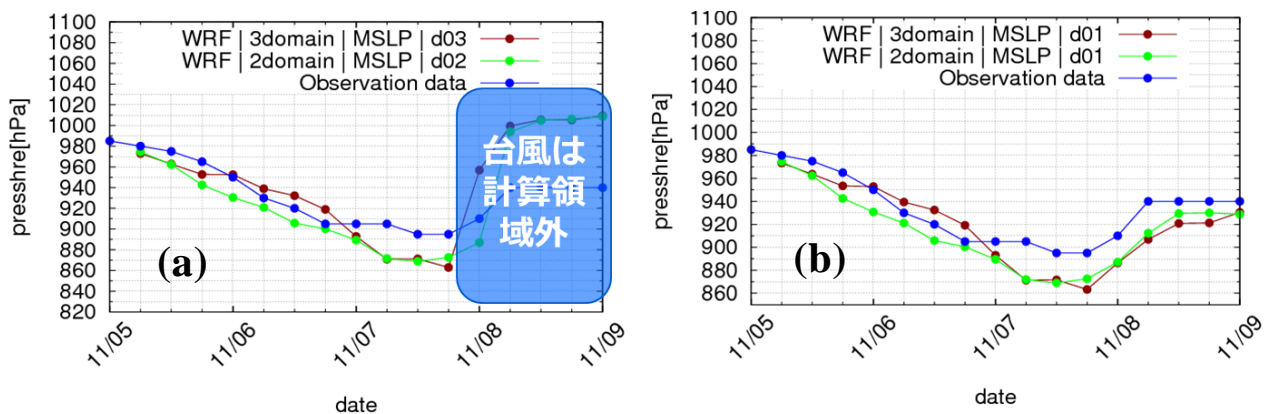


図 4.2.6 大気モデルWRFのみを用いた台風Haiyanの再現シミュレーションにおける最低気圧の比較。(a) 再現シミュレーションにおける領域2(水平解像度1km)の最低気圧と高解像度再現シミュレーションにおける領域3(水平解像度333m)の最低気圧の比較。(b) 領域1(水平解像度3km)同士の最低気圧の比較。

(3) 仮想地形実験

仮想地形実験で使用した8種類の標高データと台風経路を図 4.2. に示す。台風は移動した地形の分だけ経路が南北に移動していることがわかる。また、最低気圧と最大風速の時間変化を図 4.2. に示す。最低気圧と最大風速の時間変化については、台風が上陸する2013年11月7日以前は大きな違いは見られない。地形をずらしたことにより、台風が上陸する時刻は数時間前後する。上陸時間が前後する影響は、図 4.2.8の最低気圧の時間変化にもみられる。地形を北へ3度ずらしたケースが最も早く上陸しており、最低気圧の上昇と最大風速の低下も地形を北へ3度ずらしたケースが最も早く、上陸順と整合している。

さらに台風上陸時における有義波高の分布を図 4.2.9に示す。この図からいくつかの地点にHaiyan級の台風が上陸した場合の波高を評価できることがわかる。

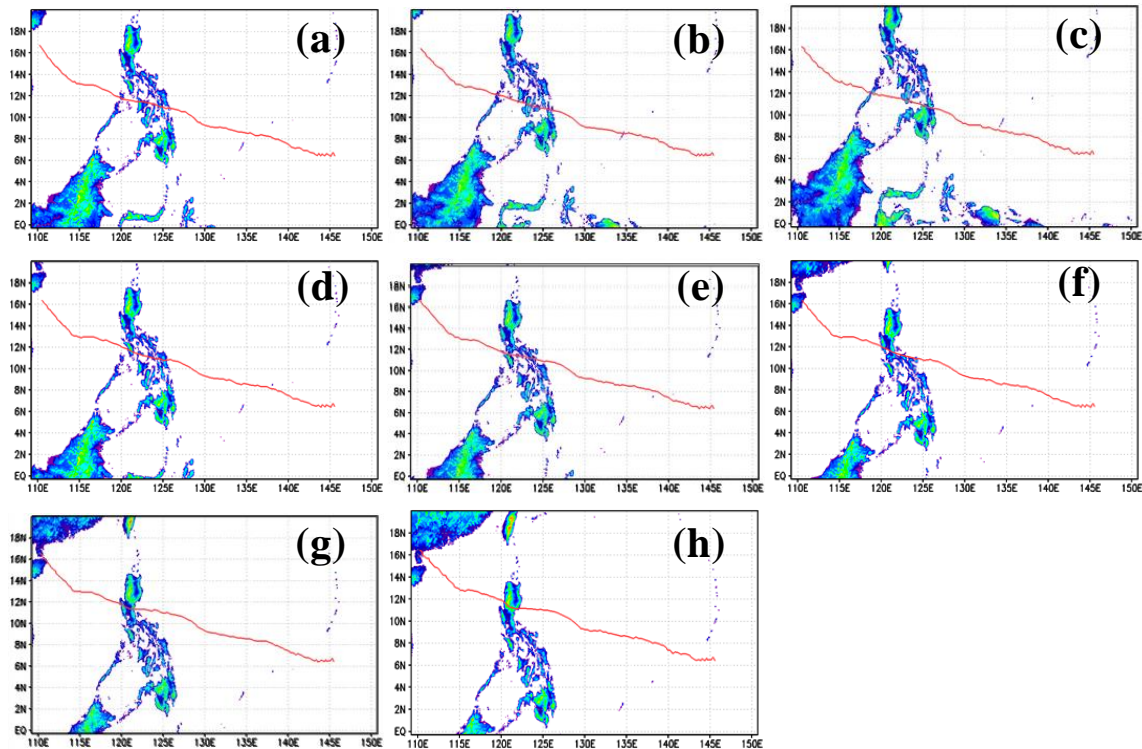


図 4.2.7 仮想地形実験における領域1の標高データと台風経路。(a) オリジナルケース (b) 北へ1度ずらしたケース (c) 北へ2度ずらしたケース (g) 南へ1度ずらしたケース (h) 南へ2度 (i) 南へ3度 (j) 南へ4度 (k) 南へ5度

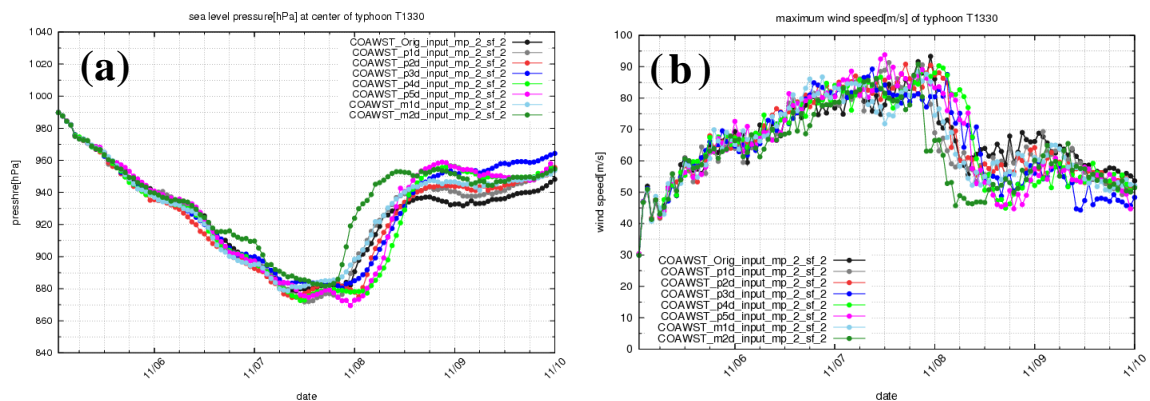


図 4.2.8 仮想地形実験における台風の最低気圧 (a) と最大風速 (b)。

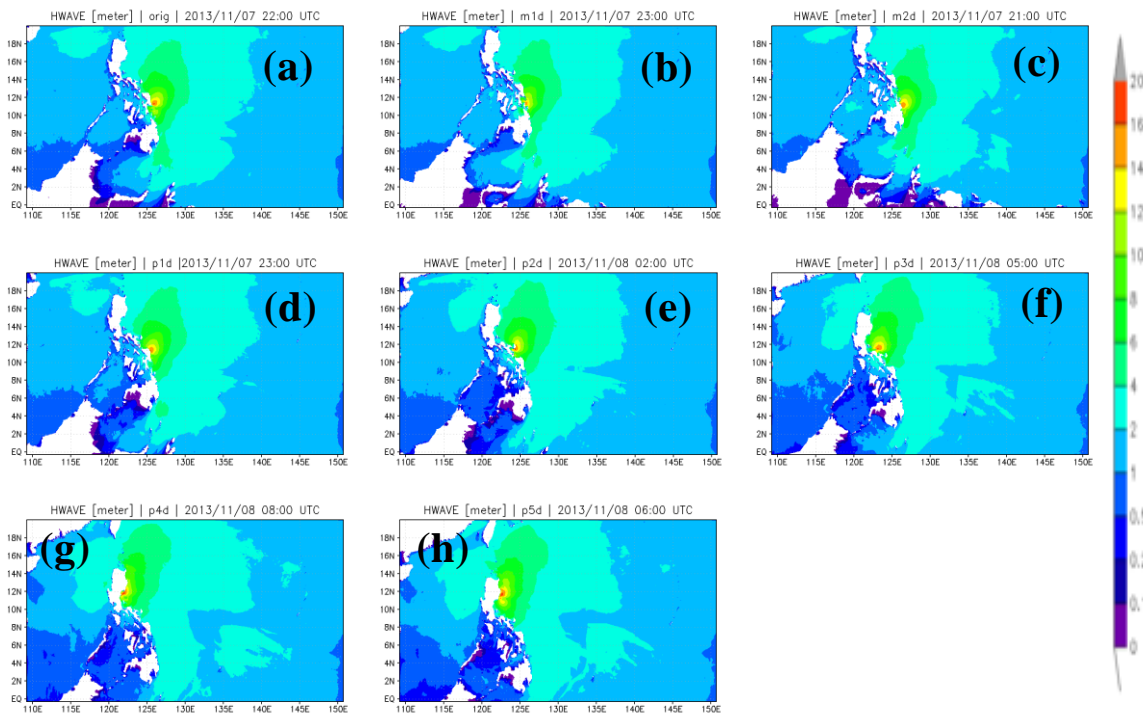


図 4.2.9 仮想地形実験における台風上陸時の有義波高の分布。(a) オリジナルケース (b) 北へ1度ずらしたケース (c) 北へ2度ずらしたケース (d) 南へ1度ずらしたケース (e) 南へ2度 (f) 南へ3度 (g) 南へ4度 (h) 南へ5度

5. 本研究により得られた成果

サブテーマ2では、気候変動の影響を考慮して台風発達から沿岸数kmまでの高潮・高波ハザードを評価可能な大気・海洋・波浪結合モデル開発をテーマ1とともに行った。さらに、スーパーコンピュータ上でのモデルの高速化を行い、演算性能の飛躍的向上を行った。

(1) 科学的意義

本研究では、大気・海洋・波浪結合モデルCOAWSTを高速に実行できるモデルを開発し、台風Haiyanのデータを用いて上陸地点を変えた仮想地形実験の妥当性を示した。この成果は、将来の気候変動による大気と海洋の影響を考慮した台風発達課程のシミュレーションを可能にし、気候変動ともなう沿岸部の波浪にどのような影響をもたらすかを明らかにすることができる。更にこのモデルを、サブテーマ(1)で開発した高解像度波伝搬モデルと結合することで、沖合から沿岸までの減災効果の定量的な検証・評価が可能となる。

本研究の成果は、様々な気候変動条件下における台風や沿岸災害のパターンを検証する際に、実用的な解像度において、短時間で多くのパターンを再現・比較を可能とした。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究の成果は、サブテーマ(1)で開発した高解像度波伝搬モデルと組み合わせることで、気候変動に伴う沿岸災害のハザード評価や、沿岸インフラの防災効果の定量化に活用することができる。我が国の政府・自治体は勿論、アジアおよび太平洋島嶼国における気候変動への適応策の検討のために、浸水範囲や経済リスクの長期評価、都市や地方インフラの整備計画、防災力向上への技術的貢献が期待できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) S. K. Singh, K. Sakakura, S. Saha, R. Mathur, C. Sharma, K. Goto, O. Watanabe, A. Musa, "Optimizations of COAWST for a large simulation on the Earth Simulator," Proceedings of the REV-A workshop on Re-Emergence of Vector Architectures, Belfast, UK, September 10th, 2018.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 森 信人, 平 陽介, 竹見 哲也, 二宮 順一, 坂倉 耕太, 撫佐 昭裕, 渡部 修, 後藤 浩二, 志村 智也, "HPC 技術適用によるシミュレーションモデルの高度化", Annual Report of the Earth Simulator April 2017-March 2018, 2018.
- 2) 坂倉 耕太, 平 陽介, 後藤 浩二, 撫佐 昭裕, "グリーンインフラを用いた減災効果を検証・評価するシミュレーションシステムの研究開発", 混相流 Vol. 32, No. 4, 2018.

- 3) 坂倉耕太、二宮順一、後藤浩二、平陽介、志村智也、撫佐昭裕、竹見哲也、森 信人、“気候変動に伴う台風・沿岸災害ハザードの長期評価手法の開発”，Annual Report of the Earth Simulator April 2018–March 2019. (投稿中)

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) S. K. Singh, “Development of optimized COAWST for the vector supercomputers,” The 29th Workshop on Sustained Simulation Performance, Sendai, Japan, March, 2019.
- 2) 森信人, 竹見哲也, 志村智也, 二宮順一, 西川敦子, 浦口あや, 撫佐昭裕, 板倉耕太, 後藤浩二, 平陽介, ”気候変動に伴う台風・沿岸災害ハザードの長期評価手法の開発”, 地球シミュレータ利用報告会, 横浜, 4月19日, 2018.
- 3) 森信人, 竹見哲也, 志村智也, 二宮順一, 西川敦子, 浦口あや, 撫佐昭裕, 板倉耕太, 後藤浩二, 平陽介, ”気候変動に伴う台風・沿岸災害ハザードの長期評価手法の開発”, 地球シミュレータ利用報告会, 品川, 3月5日, 2019.

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 「グリーンインフラを用いた減災効果を検証・評価する「沿岸災害シミュレーションシステム」の研究開発を開始」, NEC記者発表, 2017年7月7日

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 矢川 元幹 他：ペタフロップコンピューティング、培風館、2007年
- 2) 宇川 章 他：岩波講座 計算科学1 計算の科学、岩波書店、2013年
- 3) 地球シミュレータ開発史編纂チーム：地球シミュレータ開発史、海洋開発機構、2010年
- 4) 小柳 義夫 他：岩波講座 計算科学別巻 スーパーコンピュータ、岩波書店、2012年
- 5) Mori, N., Kato, M., Kim, S., Mase, H., Shibutani, Y., Takemi, T., Tsuboki, K., and Yasuda, T., “Local amplification of storm surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf, Geophys”, Res. Lett., 41, 5106-5113, 2014. <https://doi.org/10.1002/2014GL060689>.
- 6) NDRRMC, Final report re-Effects of Typhoon, ”YOLANDA” (Haiyan), [http://ndrrmc.gov.ph/attachments/article/1329/FINAL REPORT re Effects of Typhoon YOLANDA %28HAIYAN% 29 06-09NOV2013.pdf](http://ndrrmc.gov.ph/attachments/article/1329/FINAL_REPORT_re_Effects_of_Typhoon_YOLANDA_%28HAIYAN%29_06-09NOV2013.pdf).
- 7) Murakami, H., Mizuta, R., Shindo, E., “Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60 km-mesh MRI-AGCM”, Climate Dynamics, Vol. 39, pp. 2569–2584, 2016.
- 8) Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., Zambon, J. B., “Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) Modeling System,” Ocean Modeling, Vol. 35, No. 3, pp. 230–244, 2010.
- 9) Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G., “A Description of the Advanced Research WRF Version 3,” NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, p. 113, 2008.
- 10) Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C., “The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model,” Ocean Modelling, Vol. 9, No. 4, pp. 347–404,

2005.

- 11) Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C., “The SWAN wave model for shallow water,” In: Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering, vol. 1, pp. 668–676, 1996.
- 12) Hennessy, J. L. and Patterson D. A., “Computer Architecture A Quantitative Approach”, Morgan Kaufman, 2019.
- 13) NEC Corporation: NEC Fortran 2003 Programmer’s Guide, 2014.
- 14) 小林広明 他 : ベクトルコンピュータにおける高速化, SENAC, Vol. 48, No. 3, pp. 20–51, 2015.
- 15) S. K. Singh, K. Sakakura, S. Saha, R. Mathur, C. Sharma, K. Goto, O. Watanabe, A. Musa, “Optimizations of COAWST for a large simulation on the Earth Simulator,” Proceedings of the REV-A workshop on Re-Emergence of Vector Architectures, Belfast, UK, September 10th, 2018.
- 16) Nobuhito Mori, Tetsuya Takemi, “Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean”, Weather and Climate Extremes, Volume 11, 53-69, (2016)
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.09.002>
- 17) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, “A Description of the Advanced Research WRF Version 3”, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, (2008). <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- 18) Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams, “The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model”, Ocean Modelling, 9(4), 347-404, (2005).
- 19) Booij, N., Holthuijsen, L.H. and Ris, R.C., “The SWAN wave model for shallow water. In: Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering”, vol. 1, 668–676, (1996).
- 20) Larson, J., Jacob, R., & Ong, E., “The Model Coupling Toolkit: A New Fortran90 Toolkit for Building Multiphysics Parallel Coupled Models”, The International Journal of High Performance Computing Applications, 19(3), 277-292, (2005). <https://doi.org/10.1177/1094342005056115>
- 21) Ryusuke Egawa, Kazuhiko Komatsu, Shintaro Momose, Yoko Isobe, Akihiro Musa, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi., “Potential of a modern vector supercomputer for practical applications: performance evaluation of SX-ACE”, The Journal of Supercomputing, 73(9), 3948-3976, (2017).
<https://doi.org/10.1007/s11227-017-1993-y>
- 22) S. Kumar Singh et al., “Optimizations of COAWST for a Large Simulation on the Earth Simulator”, 2018 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER), Belfast, 629-636, (2018), DOI: 10.1109/CLUSTER.2018.00080

Ⅱ-3 マングローブ分布と機能評価に関する研究

国立研究開発法人国立環境研究所

生物・生態系環境研究センター 環境ストレス機構研究室

井上智美

生物・生態系環境研究センター センター長室

山野博哉

<研究協力者>

国際マングローブ生態系協会

馬場繁幸

宮城豊彦

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：27,549千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：9,565千円、平成30年度：8,992千円、令和元年度：8,992千円）

[要旨]

熱帯亜熱帯の沿岸地域では、温暖化に伴う海面上昇や台風、高潮・高波による人間社会への被害の増大が懸念され、温暖化適応策としてのマングローブ生態系保全やマングローブ植林が積極的に進められるようになってきた。そのため、マングローブ生態系による沿岸保護機能の具体的な評価のための科学的な知見の集積が急務となっている。本サブテーマでは、課題全体として焦点をあてているフィリピンにおけるマングローブ生態系分布情報を、気候変動適応計画におけるグリーンインフラに活用できるように整理することと、温暖化による気温上昇がマングローブ植物の生長と形態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

地図情報整備より、台風や高潮・高波の襲来といった災害時に被害を受けやすい低標高・低傾斜地形にはマングローブ生態系が分布しており、フィリピン沿岸においてグリーンインフラは効率的であることが再確認された。ただし、土地利用変化などにより、マングローブ生態系が消失している場合や、小さく離散している場合も多く認められた。マングローブ生態系を活用した適応策を講じる際には、このような林分タイプを考慮する必要がある。整備したデータは具体的な適応計画に活用できるように、配信websiteに掲載した。

栽培実験により、気候変動に伴う気温上昇が進行した場合、マングローブ植物（ヤエヤマヒルギとオヒルギ）の生残や成長、形態に影響が及ぶ可能性があることが明らかとなった。気温に対する応答メカニズムには葉の同化・代謝機構が深く関わっている可能性が示唆され、その応答特性は樹種によって異なっていた。成長速度や形態は、植林後のグリーンインフラとしての沿岸保護機能を左右する重要因子である。本栽培実験におけるヤエヤマヒルギとオヒルギの最適生育温度（成長速度が最大の栽培温度）は25℃付近であった。今後、より詳細な実験が必要であるが、現在の熱帯・亜熱帯の気温が上昇し続けた場合、マングローブ樹林群の持つ沿岸保護機能が変化する可能性が示唆された。

また、マングローブ植林地における野外調査より、過去10-15年ほどの期間の植栽情報が分かっている林分があれば、その地域におけるマングローブ植物の形態・成長の経時変化を追うことが可能であることが明らかとなった。このようなパラメータによるマングローブ樹林群の防波機能モデルを使用すれば、より具体的な適応計画につなぐことが出来る。

[キーワード]

マングローブ、温暖化応答、植物生理生態機能、グリーンインフラ、マングローブ分布

1. はじめに

気候変動による温暖化が進行し、様々な影響が生じるのではないかとされている。熱帯亜熱帯の沿岸地域では、温暖化に伴う海面上昇や台風、高潮・高波による人間社会への被害の増大が懸念されている。マングローブ生態系は熱帯・亜熱帯の干潟に形成する樹林群であり、上記のような被害を軽減する防波堤の役割を果たしている。そもそも立木が密集した樹林群には、防風や防波機能があることが分かっているが、マングローブ樹林群の場合、樹林を構成する植物のユニークな形態によって、さらに高い防風・防波機能があるとされている。マングローブ植物の多くは根の一部を地上に露出している（地上根）。その形状は樹種によって様々（支柱根・膝根・筍根・板根など）であり、発達した森林では地上数メートル高まで地上根が密集している。このため、マングローブ樹林内を通過する風波は地上根に起因する高い抵抗力によって減衰するとされている。実際に、台風、高潮・高波の際にマングローブ樹林群による波の緩衝によって後背地にある村や町への被害が抑えられたという報告や地域ベースの経験談が数多くあり、近年は温暖化適応策としてのマングローブ生態系保全やマングローブ植林（グリーンインフラ）が積極的に進められるようになってきた。また、マングローブ樹木の高い生産性に起因する豊富な漁業資源や、高い炭素貯留機能、多様な生物相、観光資源となるレクリエーション機能といった、沿岸保護機能以外の生態系サービス機能も高いことから、気候変動適応のみならず気候変動緩和や生物多様性保護といった側面からも期待されている。しかし、マングローブ樹林群の持つ沿岸保護機能を評価するための生物学的・工学的知見が少なく、実際の適応策としてのマングローブ生態系保全や植林事業は、場当たりの行われてきているという現状が否めない。また、将来温暖化が進行した場合、気温上昇やそれに伴う海面上昇がマングローブ植物の形状や生育状態へ及ぼす影響についても知見が不足している。そのため、マングローブ生態系による沿岸保護機能の具体的な評価のための科学的な知見の集積が急務となっている。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、フィリピンにおけるマングローブ生態系分布情報を収集し、マングローブ生態系分布情報をGISデータとして整備し、生態系分布の現状評価を行う。また、マングローブ植物について、環境変動に対する機能応答を解明するための検証実験を行う。生態系による沿岸保護機能の現状評価を行うと共に、検証実験から得られた知見を基に当該地域における沿岸保護機能の将来予測を行う。

研究課題全体の具体的な目的と内容は以下の通りである。

- ・ハリケーンや沿岸侵食といった災害の危機にさらされている熱帯亜熱帯地域において、沿岸生態系（マングローブ）を基盤とした適応策の効果を定量的に把握することで、持続可能な社会の構築の一助とする。
- ・日本の科学技術（適応策の効果を計測する技術やモデル分析等）を活用して、熱帯亜熱帯地域の効果的な適応策検討を支援する科学的知見の提供を目指す。

本サブテーマでは、マングローブ生態系を活用した適応策を講じるために必要な生物学的知見の収集と、気候変動によるマングローブ生態系への影響を評価することを担当した。具体的には、マングローブ生態系の分布や沿岸地理情報の整備と、実験や野外調査によるマングローブ植物の気温応答メカニズムの解明を行うことを目的とした。

3. 研究開発方法

3.3.1 フィリピン沿岸のマングローブ生態系分布と地形の類型化

3.3.1.1 データの収集と整理

海岸線データには、ESRI標高データ（空間解像度90m）を用い、標高0mを海岸線として整備した。地形データには、空間分解能30mのSRTMデータ（Shuttle Radar Topography Mission）を使用した。ただし、フィリピンをカバーするシーンに一部欠損と思われるデータがあったため、欠損箇所を同じ空間分解能

30mのGDEMデータで補完した。また、画素単位でも欠損地と思われる場所が存在したため、これもGDEMデータを用いて補完した。

マングローブ生態系のマッピングには、欧州宇宙機関 (ESA) が運用する地球観測衛星のSentinel-2と、アメリカ地質調査所 (USGS) が運用する地球観測衛星のLandsat 8を使用した。なお、Sentinel-2は現在、同じ性能を持つセンサを2機体制で運用しており、それぞれSentinel-2AとSentinel-2Bと呼ばれる。Sentinel-2AとSentinel-2Bは、それぞれ2015年6月23日と2017年3月7日に打ち上げられ、Landsat 8は、2013年2月11日に打ち上げられており、現在も運用が継続している。

3.3.1.2 マングローブ分布図の作成

フィリピン全土を対象として、教師無し分類であるKMean法を使った分類を行った。分類に使用したデータは、Sentinel-2とLandsat 8のいずれも、2016年1月1日から2018年3月までとした。分類は、雲マスクやMedian処理を行って雲無し画像を作成し、KMean法による分類を30クラス、解像度をSentinel-2とLandsat 8それぞれ20mと30mに設定して実行した。また、フィリピンを含むアジア地域に分布するマングローブ樹種を文献調査により整理した。文献検索はWeb of Scienceを用いて1970年-現在までの文献 (科学論文・書籍・報告書) についてキーワード検索をし、文献内に記載されているマングローブ樹種の在情報を、[文献ID-著者-記載年-緯度経度-樹種-林齢-地形-土地利用状況] に関連付けてデータベースとして整理した。

3.3.1.3 沿岸地形の類型化

QGISのQGhainageプラグインを使用して、海岸線上に500m間隔でポイントを生成した。次に、QGISのBuffer機能を使って、生成したポイントを中心とする半径100mのバッファポリゴンを生成し、Clip機能を使って、生成したバッファポリゴンと海岸線データの重なる領域をクリップポリゴンとして切り出した。収集したDEMデータを用いて、クリップポリゴン内の標高と傾斜角を計算し、地形類型マップを作成した。

3.3.2 気候変動に伴う気温上昇がマングローブ植物の生育 (グリーンインフラ) に及ぼす影響

3.3.2.1 環境制御チャンバーにおける温暖化実験

フィリピン沿岸域に気候変動適応策 (グリーンインフラ) として植林されている代表的な2樹種ヤエヤマヒルギとオヒルギを用いて、温暖化栽培実験を行った。2樹種の散布体を沖縄県西表島にて採取した。散布体の採集は各樹種のフェノロジーに合わせて、ヤエヤマヒルギは7月に、オヒルギは3月に行った。国立環境研究所敷地内 (茨城県つくば市) の材料準備温室内 (気温25 °C、湿度70%) で1年間砂植栽培した後、数段階の気温 (15-35°C) に制御した人工気象チャンバー (自然光温室、湿度70%) 内に移して温暖化実験を行った。栽培実験は、気温一定下での実験と、昼間と夜間の温度差のある状況下での実験を行った。なお、本実験で設定した気温は、現在のフィリピンの年間気温変動 (17-33°C) をベースとして、



図4.3.1 栽培実験用のマングローブ植物ヤエヤマヒルギ
国立環境研究所材料提供温室

気候変動に伴って50-100年後に起こり得る気温上昇シナリオ（RCP6.0とRCP8.5では予測最高気温が35°C付近になる）を想定した。

3.3.2.2 測定と解析

気候変動適応策としてマングローブ植物を沿岸域に植林した場合、植林後の生残・成長速度・形態変化が、沿岸保護機能（台風や高波などの災害の減災効果）に大きく影響する。本実験では、異なる気温下におけるヤエヤマヒルギとオヒルギ実生の生残・成長速度・形態変化を解析した。

栽培実験開始日から51日間の生残と形態変化を解析することとし、実生の生死については6または7日間ごとに記録した。形態変化として、主軸高成長速度（mm day⁻¹）、地際直径成長速度（mm day⁻¹）、および総側枝長変化速度（mm day⁻¹）を算出すると共に、51日目における各個体の葉数を記録した。加えて、実験開始後約50日目に各生育温度から半数の個体を無作為に選定し、LI-6800（LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA）を用いて新葉のガス交換とクロロフィル蛍光を測定し、光合成に関わるパラメータを算出した。これらの測定の際、LI-6800チャンバー内の温度は各生育温度と同じ温度に設定し、CO₂濃度は400ppmに設定した。温度間で形態変化および光合成速度に違いがあるかを評価するため、統計ソフトR-3.6.2上で一般化線形モデル（GLM）による解析を行った。今回の解析では、赤池情報量規準（AIC）を基に温度間の違いを最も良く予測するモデルを選択した。

4. 結果及び考察

フィリピンにおけるマングローブ生態系分布情報および地形データ等を衛星データをもとに収集し、マングローブ生態系分布情報をGISデータとして整備した。これにより生態系分布の現状評価が可能となった。また、マングローブ植物について、環境変動に対する機能応答を解明するための検証実験を行った。特にマングローブ植物の温度耐性についての脆弱性を得た。現地調査をもとに、生態系による沿岸保護機能の現状評価を行うと共に、検証実験から得られた知見を基に、沿岸保護機能の予測を行った。計画通りの成果を得た。

4.3.1 フィリピン沿岸マングローブ生態系分布および沿岸地形

4.3.1.1 マングローブ分布図の作成

文献調査の結果、フィリピンには45種のマングローブ樹種が分布しており、インドネシアの55種、マレーシアの48種に次いで世界で3番目に樹種数が多いことが明らかとなった（表4.3.1）。また、気候変動適応策や生物多様性維持、漁業資源涵養を目的とした植林事業も数多く実施されており、植林樹種としてはヒルギ科のヤエヤマヒルギやオヒルギが良く使われていた。ヒルギ科の樹種は元来フィリピンの

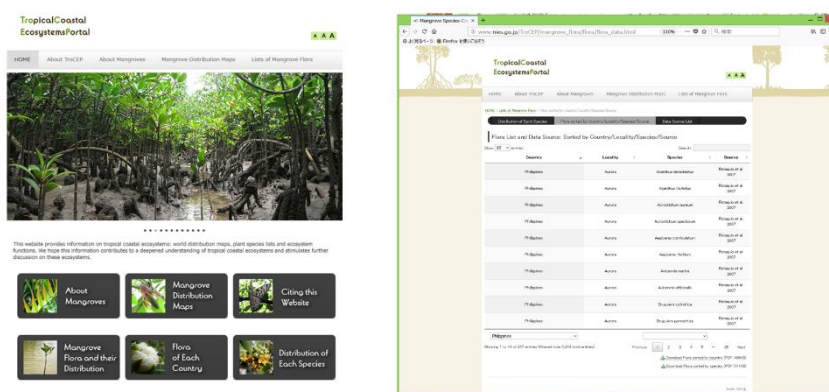


図4.3.2 フィリピンにおけるマングローブ樹種データ

文献調査により247件を抽出

国立環境研究所発信のwebsiteより公開中

マングローブ生態系を構成する優占樹種であることに加えて、親木から胚軸を伸ばした状態で散布体として落果するため、苗木育苗をする必要がなく簡便に植林できることによると思われる。一方で、同じ

くフィリピンの優占樹種であるクマツヅラ科のヒルギダマシやハマザクロ科のマヤブシキは、植林前に苗畑育苗をする手間と資金がかかるため、植林樹種として選定されづらいことが明らかとなった。また、元来はヒルギダマシ林であった地域にヒルギ科の植物が植林されることもあり、底生生物相が変化していることを指摘し懸念する報告も多々あった。本課題ではマングローブ生態系の防波機能の定量化に課題の焦点を絞っており、マングローブ樹種と底生生物相といった生物間相互作用は課題の範囲外である。しかし、今後、地域ベースでの気候変動適応策としてマングローブ生態系を活用するためには、地域ベースでのマングローブ生態系の生物相を考慮していく必要がある、本課題で整備した地域別の分布樹種データベースは大いに貢献すると考えられる。なお、本データは国立環境研究所生物・生態系環境研究センターから発信されているウェブサイト熱帯・亜熱帯沿岸生態系データベース：Tropical Coastal

Ecosystems Portal (TroCEP)』URL:http://www.nies.go.jp/TroCEP/index.htmlとして公開している(図

		Central Indo-Pacific																	
		South-east Asia						East Asia			Australia and New Zealand								
		Brunei Darussalam	Cambodia	Indonesia	Malaysia	Myanmar	Philippines	Singapore	Thailand	Timor-Leste	Viet Nam	China	Hong Kong	Taiwan	Japan	Australia	Christmas Island	New Zealand	
		Number of distributed countries																	
		Number of distributing species																	
		32	36	55	48	37	45	34	40	27	36	30	14	18	14	44	5	1	
Species	1	Acanthus ebracteatus	12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
	2	Acanthus ilicifolius	14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
	3	Acrostichum aureum	14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
	4	Acrostichum danaeifolium	1	+															
	5	Acrostichum speciosum	12	+	+	+	+	+	+	+	+	+							
	6	Aegialitis annulata	4		+			+											
	7	Aegialitis rotundifolia	5		+	+	+		+										
	8	Aegiceras corniculatum	14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
	9	Aegiceras floridum	5		+	+	+	+			+								
	10	Aglaia cucullata	3		+	+			+										
	11	Avicennia alba	9	+	+	+	+	+	+	+	+								
	12	Avicennia bicolor	0																
	13	Avicennia germinans	0																
	14	Avicennia integra	2			+													
	15	Avicennia marina	16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	INT-EX
	16	Avicennia officinalis	11	+	+	+	+	+	+	+	+								
	17	Avicennia rumphiana	5		+	+	+	+											
	18	Avicennia schaueriana	0																
	19	Bruguiera cylindrica	12	+	+	+	+	+	+	+	+	+							
	20	Bruguiera exaristata	4		+			+			+								
	21	Bruguiera gymnorhiza	16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	EX	INT			+
	22	Bruguiera hainesii	6		+	+	+	+	+	+	+								
	23	Bruguiera parviflora	11	+	+	+	+	+	+	+	+								
	24	Bruguiera sexangula	13	+	+	+	+	+	EX	+	+	+	+						+
	25	Bruguiera x rhynchopetala	3			+						+							
	26	Campostemon philippinense	3		+	+	+												
	27	Campostemon schultzi	3			+	+												
	28	Ceriops australis	3		+					+									
	29	Ceriops decandra	9		+	+	+	+		+				+					
	30	Ceriops tagal	15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	EX	INT			
	31	Ceriops zippeliana	8		+	+	+	+	+	+	+								
	32	Conocarpus erectus	0																
	33	Cynometra iripa	9		+	+	+	+		+	+								+
	34	Diospyros littorea	1																
	35	Dolichandrone spathacea	12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
	36	Excoecaria agallocha	15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	37	Excoecaria indica	5		+	+	+	+	+										
	38	Heritiera fomes	3			+	+		+										
	39	Heritiera globosa	3	+	+	+	+												
	40	Heritiera littoralis	16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	41	Kandelia candel	12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	42	Kandelia obovata	6		+														
	43	Laguncularia racemosa	0																
	44	Lumnitzera littorea	12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	45	Lumnitzera racemosa	15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	46	Lumnitzera x rosea	4		+			+											
	47	Mora oleifera	0																
	48	Nypa fruticans	14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	49	Osbornia octodonta	4		+	+		+											
	50	Pelluciera rhizophorae	0																
	51	Pemphis acidula	16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	52	Rhizophora apiculata	13	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						INT
	53	Rhizophora mangle	0																
	54	Rhizophora mucronata	14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	INT			
	55	Rhizophora racemosa	0																
	56	Rhizophora samoensis	0																
	57	Rhizophora stylosa	14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	INT			
	58	Rhizophora x harrisonii	0																
	59	Rhizophora x lamarckii	4		+	+		+											
	60	Rhizophora x neocaledonica	0																
	61	Rhizophora x selala	0																
	62	Scyphiphora hydrophyllacea	11	+	+	+	+	+	+	+		+							
	63	Sonneratia alba	14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	64	Sonneratia apetala	4			+		+						INT					
	65	Sonneratia caseolaris	12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+					
	66	Sonneratia griffithii	5	+	+	+	+		+										
	67	Sonneratia lanceolata	3		+			+											+
	68	Sonneratia ovata	10	+	+	+	+	INT	+	+	+	+							+
	69	Sonneratia x guingai	5	+	+	+	+		+										+
	70	Sonneratia x hainanensis	1									+							
	71	Sonneratia x urama	4			+	+			+									+
	72	Tabebuia palustris	0																
	73	Xylocarpus granatum	12	+	+	+	+	+	+	+	+	+							+
	74	Xylocarpus moluccensis	10	+	+	+	+	+	+	+	+								+

表4.3.1 フィリピンと周辺国のマングローブ樹種構成

4.3.2)。

図4.3.3および4.3.4に、マングローブ域の抽出結果を示す。海岸線に沿ってマングローブの分布が見られるが、中部に比較的多くの分布が見られた（図4.3.2）。また、都市や住宅、農耕地への土地利用変



図4.3.3 フィリピン沿岸域マングローブ分布図
左図：フィリピン全土
右図：パナイ島北部の拡大図
緑色のポリゴンがマングローブを示す。



図4.3.4 様々な分布状況
左図：ケソン州のまとまったマングローブ林
中図：カヴィテ州の都市とわずかに残ったマングローブ林
右図：パナイ島ロハス地域の農耕地の跡地の植林地
緑色のポリゴンがマングローブを示す。

化に伴って分布がまばらに離散しているケースが散見された。人口が多い場所は特にその傾向が強く、まとまったマングローブ林分というより、小面積で疎密度な林分が多く見受けられた（図4.3.3中図）。また、一度農耕地に転換された後に再度マングローブ植林が行われたと推定されるケースも多く、そのような場所は農耕地への転換の際に区画化された形状のまま、内陸部に陸封されたように分布している（図4.3.3右図）。マングローブ林の沿岸保護機能は、こういった林分状況（樹木密度や林分のまとまり面積）や周囲の配置状況（人家や海岸線との位置関係）によって異なることが予想されるため、マングローブ生態系を活用した適応策を講じる際には、本課題で整備した地図情報が必須となる。

4.3.1.2 沿岸地形の類型化

フィリピン全土の海岸域を対象に、平均標高と地盤傾斜角をベースに類型化を行った結果を図4.3.5に示す。作成した類型地図に4.3.1.1で整備したマングローブ林分布域を載せると、平均標高・地盤傾斜角の低い場所にマングローブ林が分布している傾向が読み取れる（部分拡大図）。台風や高潮・高波の襲来といった災害時に被害を受けやすい地形にはマングローブ林が分布しており、生態系を用いた適応策（グリーンインフラ）は効率的であることが窺える。本データは台風の進路予測データと合わせると、マングローブ生態系を活用した気候変動適応策の地域ポテンシャルを示すことに貢献できる。

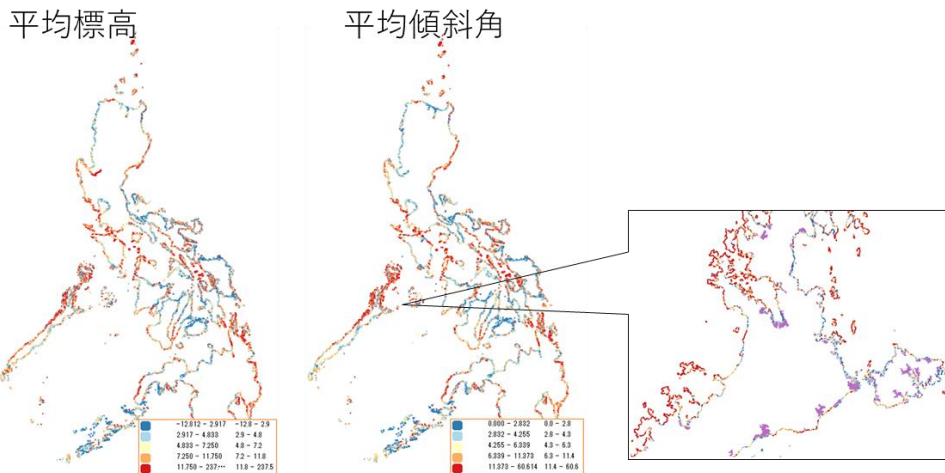


図4.3.5 フィリピン沿岸域の平均標高と平均傾斜角
暖色系は平均標高・傾斜が高いことを示し、寒色系は平均標高・傾斜が低いことを示す。
部分拡大図内の紫色ポリゴンはマングローブ林分布域を示す。

4.3.2 気候変動に伴う気温上昇がマングローブ植物の生育（グリーンインフラ）に及ぼす影響

4.3.2.1 ヤエヤマヒルギとオヒルギの生残と気温

15-30℃の栽培温度下では、2種とも、栽培実験期間中（51日間）の生残率は100%であった。一方で、35℃では2種ともに実験終了時の生残個体数が0個体となった（図4.3.6）。また、高温下（35℃）で枯死に至る応答には種差が見られた。ヤエヤマヒルギは、8割以上が実験開始後13日目までに枯死し、19日目までには全個体が枯死した。一方で、オヒルギは、栽培実験開始から26日目に枯死する個体が現れ始め、45日目に全個体が枯死した（図4.3.6）。このことから、ヤエヤマヒルギとオヒルギでは高温に対する耐性が異なっていることが窺える。2種では葉の気孔のサイズや数に違いが見られる（図4.3.7）。本課題では研究期間の都合上、詳細検討に至らなかったが、小さく高密度に気孔が並んでいるオヒルギは高温

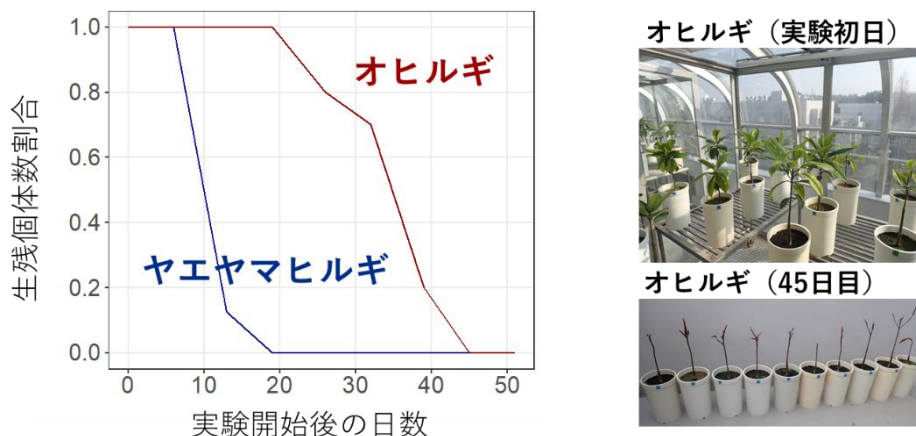


図4.3.6 35℃におけるマングローブ2種（ヤエヤマヒルギ・オヒルギ）の生残曲線

下でも蒸散を効率的に行うことで極端な葉温上昇を防いでいる可能性があり、このことがヤエヤマヒル

ギとの種差の一因になっている可能性がある。また、本実験では栽培温度を常時一定にして行ったが、実際の野外生態系では日中と夜間の温度差がある（夜間に気温が低下することが多い）ため、野外における2樹種の気温に対する生残応答速度は本実験結果とは変わる可能性があることに留意する必要がある。今後温暖化が進行して気温が上昇した場合、マングローブ植物の生残そのものに負の影響がおよぶ可能性があることと、その影響には樹種差がある可能性があることを考慮した適応策を講じる必要があると考えられる。今後さらに具体的な気温シナリオ下での栽培実験をすることで、より具体的な影響予測が可能になると考えられる。

4.3.2.2 ヤエヤマヒルギとオヒルギの形態変化と気温

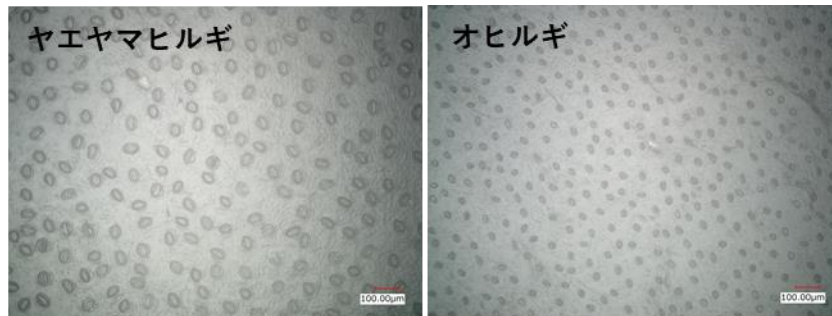


図4.3.7 ヤエヤマヒルギとオヒルギの葉の気孔

デジタルマイクロスコープにて撮

15-30℃における形態は栽培温度によって異なっており、その応答には種差が見られた。

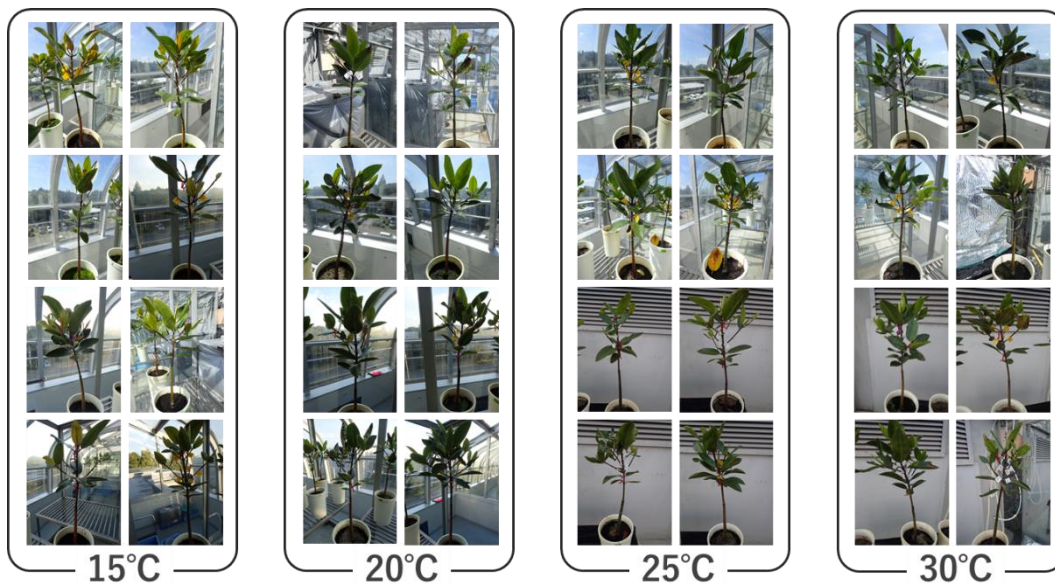


図4.3.8 栽培実験終了時（51日目）の各気温下のヤエヤマヒルギ

主軸高（樹高）成長速度の平均値は、ヤエヤマヒルギでは25℃、30℃、20℃、15℃の順に高く、15℃または20℃と25℃または30℃の間に統計学的な差が認められた（図4.3.9）。一方、オヒルギでは30℃、25℃、20℃、15℃の順に高く、15℃または20℃と25℃または30℃の間に統計学的な差が認められた（図4.3.9）。このことから、温暖化による気温の上昇は、植林されたヤエヤマヒルギとオヒルギの鉛直方向の成長速度の増加に寄与し、防波機能の増加に影響することが示唆された。

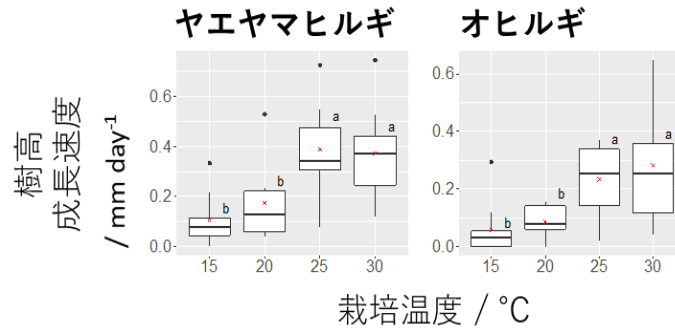


図4.3.9 ヤエヤマヒルギとオヒルギの主軸高（樹高）生長速度と気温の箱ひげ図中の×印は平均値を、異なるアルファベットは温度間における統計学的な差があることを示す。N=10

直径成長速度の平均値は、ヤエヤマヒルギでは25°C、30°C、20°C、15°Cの順に高く、15°Cまたは20°Cと25°Cまたは30°Cの間に統計学的な差が認められた（図4.3.10）。一方、オヒルギでは25°C、30°C、20°C、15°Cの順に高く、20°Cと30°C間以外の全ての組み合わせにおいて統計学的な差が認められた（図4.3.10）。このことから、温暖化による気温のある程度の上昇（本実験では15-25°C）は、植林されたヤエヤマヒルギとオヒルギの幹直径成長速度の増加に寄与するが、高温域では低下する可能性が示された。オヒルギでは30°Cの栽培温度で低下が認められたので、ヤエヤマヒルギよりも高温に対する幹直径成長の応答が敏感である可能性がある。適応策としてマングローブを植林した場合、温暖化に伴う気温上昇と共に防波機能の変化速度が影響を受ける可能性があること、またその影響には樹種差があることを考慮する必要がある。

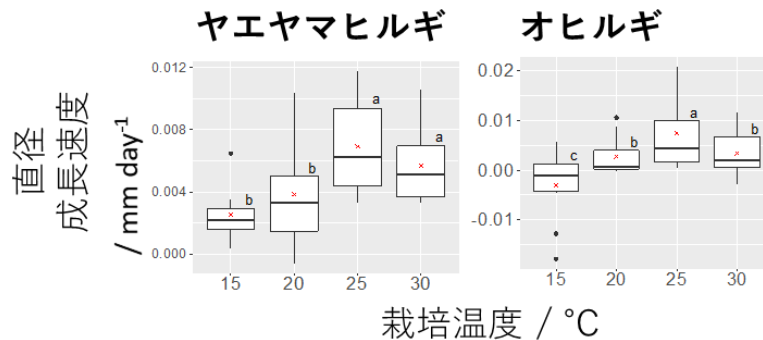


図4.3.10 ヤエヤマヒルギとオヒルギの直径生長速度と気温の箱ひげ図中の×印は平均値を、異なるアルファベットは温度間における統計学的な差があることを示す。N=10

側枝長変化速度の平均値は、ヤエヤマヒルギでは25°C、30°C、20°C、15°Cの順に高く、15°Cまたは20°Cと25°Cまたは30°Cの間に統計学的な差が認められた（図4.3.11）。一方、オヒルギでは、25°C、30°C、20°C、15°Cの順に高く、15°Cまたは20°Cと25°Cまたは30°Cの間に統計学的な差が認められた（図4.3.11）。側枝発生数の平均値は、ヤエヤマヒルギでは20-30°Cでは変わらなかったが、15°Cで統計学的に有意な低下が見られた。また、オヒルギでは25°Cと30°Cで高く、15°Cと20°Cで統計学的に有意な低下が見られた。側枝の発生は樹木の構造を複雑化させ、防波機能を高める効果があると考えられるため、植林後の防波機能経時変化を考える上で重要である。温暖化に伴う気温の上昇が、樹木地上部の側枝数に影響を及ぼす可能性があること、またその影響には樹種差があることを考慮する必要がある。

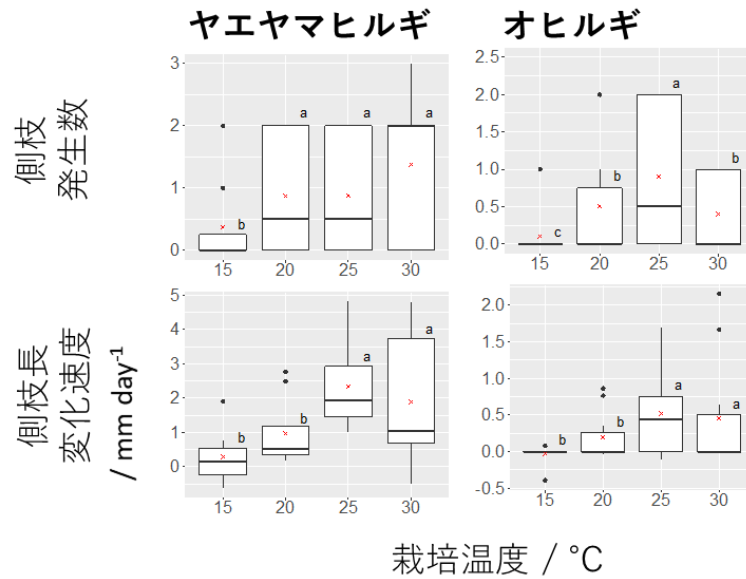


図4.3.11 ヤエヤマヒルギとオヒルギの側枝発生数変化、側枝長変化速度と気温の箱ひげ図。図中の×印は平均値を、異なるアルファベットは温度間における統計学的な差があることを示す。N=10

栽培実験終了時（51日目）の平均葉数は、ヤエヤマヒルギでは30°C、25°C、20°C、15°Cの順に大きく、15°Cとその他の栽培温度（20°C、25°C、30°C）で統計学的な差が認められた（図4.3.12）。ヤエヤマヒルギの栽培実験期間中の平均展葉数は15-30°Cの栽培温度の上昇に伴って増加しており、全ての栽培温度間に統計学的な差が認められた。栽培実験期間中の平均落葉数も15-30°Cの栽培温度の上昇と共に増

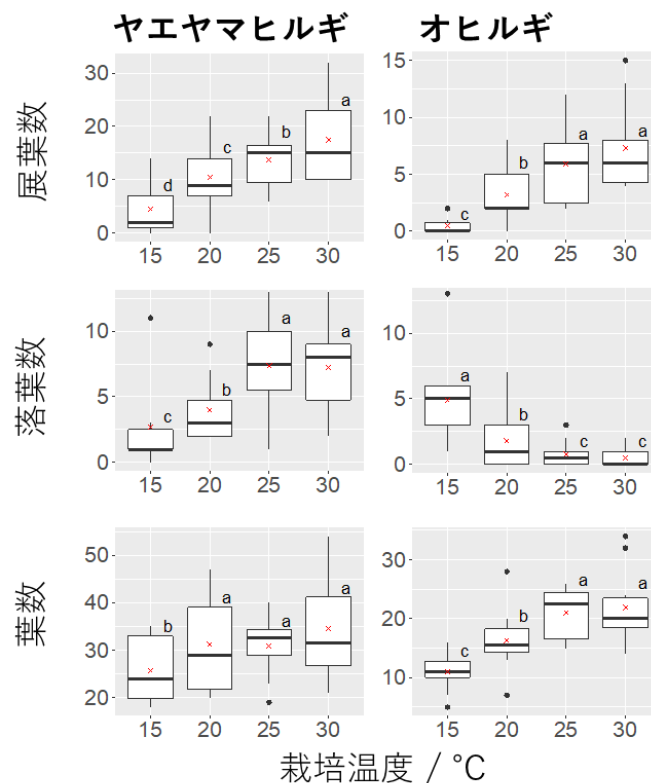


図4.3.12 ヤエヤマヒルギとオヒルギの栽培実験終了時の葉数、展葉数、落葉数と気温の箱ひげ図。図中の×印は平均値を、異なるアルファベットは温度間における統計学的な差があることを示す。N=10

加しており、15-25℃までは全ての栽培温度間に統計学的な差が認められ、25℃と30℃では同程度だった。気温上昇による展葉数増加の効果が、落葉数増加によって減じられ、結果として、栽培実験終了時に個体についている平均葉数はほとんど変わらないということになっていた。15℃での平均葉数が少なかったのは、展葉数が少なかったことに起因していると考えられる。

一方、オヒルギでは25℃、30℃、20℃、15℃の順に平均葉数が高く、15-25℃ではすべての栽培温度間で統計学的な差が認められ、25℃と30℃では変わらなかった。栽培期間中の平均展葉数は30℃、25℃、20℃、15℃の順に高く、15-25℃ではすべての栽培温度間で統計学的な差が認められ、25℃と30℃では変わらなかった。また、栽培期間中の平均落葉数は、15℃、20℃、25℃、30℃の順に高く、15-25℃ではすべての栽培温度間で統計学的な差が認められ、25℃と30℃では変わらなかった。栽培温度の増加に伴って葉の展葉数が増加しているのに、落葉数は低下するため、結果として個体についている葉の数は、気温と共に増加する結果となっていた。

葉数は地上部の構造を複雑化させるとともに、樹冠を通る流体の抵抗となるため、気温上昇に伴う葉数増加は、防波機能の増加に寄与すると考えられる。特に高波高潮で高水位になり、枝葉が水面下に冠水すると急激に抵抗が大きくなる。温暖化に伴う気温の上昇が、樹木地上部の葉数に影響を及ぼす可能性があること、またその影響には樹種差があることを考慮する必要がある。

また、本課題のテーマとは直接関係はないが、ヤエヤマヒルギとオヒルギの落葉の気温応答パターンは、気候変動緩和の側面から注目されている炭素貯留機能に影響を及ぼすと考えられる。マングローブ生態系は特に、単位面積あたりの地下部の炭素貯留量が高いことが分かっているが、本実験結果はヤエヤマヒルギでは温暖化に伴う気温上昇で土壌へのリター供給量が増すのに対し、オヒルギでは減少する可能性を示している。

4.3.2.3 ヤエヤマヒルギとオヒルギの代謝機能と気温

植物の生長（炭素同化）を規定する光合成にかかわる代謝機能は、栽培温度によって異なっており、その応答パターンに樹種差が見られるパラメータがあった。

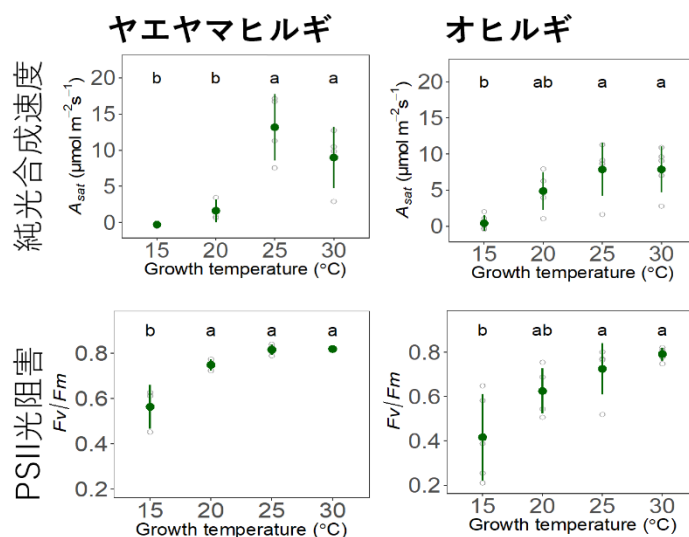


図4.3.13 ヤエヤマヒルギとオヒルギの栽培実験終了時の栽培温度での純光合成速度・ F_v/F_m 値と気温。図中の緑丸印は平均値を、白抜き丸印は個体ごとの生データを、エラーバーは標準偏差を、異なるアルファベットは温度間における統計学的な差があることを示す。

栽培実験終了時（50日目）純光合成速度の平均値は、ヤエヤマヒルギでは25℃、30℃、20℃、15℃の順に高く、15℃または20℃と25℃または30℃との間に統計学的な差が認められた（図4.3.13上段）。一

方でオヒルギでは30℃、25℃、20℃、15℃の順に高く、15℃と25℃または30℃の間に統計学的な差が認められた。また、栽培実験終了時（50日目）のFv/Fm値は、ヤエヤマヒルギとオヒルギともに15-30℃の栽培温度の上昇に伴って高くなっていた（図4.3.13下段）。ヤエヤマヒルギでは15℃とその他の間に統計学的な差が認められ、オヒルギでは15℃と25℃または30℃の間に統計学的な差が認められた。2種とも光合成系IIの電子収量が15℃で低下していることが低温での純光合成活性の低下につながっていると考えられる。

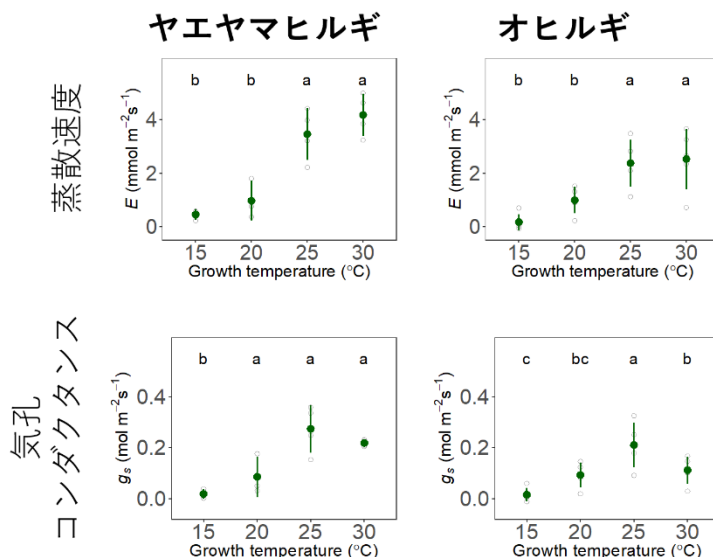


図4.3.14 ヤエヤマヒルギとオヒルギの栽培実験終了時の栽培温度での蒸散速度・気孔コンダクタンスと気温。図中の緑丸印は平均値を、白抜き丸印は個体ごとの生データを、エラーバーは標準偏差を、異なるアルファベットは温度間における統計学的な差があることを示す。N=10

栽培実験終了時の栽培温度における蒸散速度の平均値は、ヤエヤマヒルギ、オヒルギともに30℃、25℃、20℃、15℃の順に高く、15℃または20℃と25℃または30℃との間に統計学的な差が認められた（図4.3.14上段）。一方、気孔コンダクタンスの平均値は、ヤエヤマヒルギでは25℃、30℃、20℃、15℃の順に高く、15℃とその他の温度の間に統計学的な差が認められた（図4.3.14下段）。オヒルギでは、平均値は25℃、30℃、20℃、15℃の順に高く、15℃と25℃・30℃との間と、25℃とその他の温度との間に統計学的な差が認められた。以上のように、気温の上昇に伴って2種とも葉からの蒸散速度が増していた（図4.3.14上段）。15-25℃では気温上昇に伴って気孔コンダクタンスも高くなり、PSIIの量子収率も上がることから（図4.3.13）CO₂同化が進んでいたと考えられる。30℃では、2種ともに気孔コンダクタンスが低下していることから、気孔を閉じていることが窺える。このため、葉内CO₂濃度が低下し、ヤエヤマヒルギでは純光合成速度が低下し始め、オヒルギでは気温に伴う純光合成速度上昇が停滞したと考えられる。気温上昇がさらに進行すると、CO₂同化速度が低下する一方で、気孔以外のクチクラからの水分蒸発が進み、枯死に至る可能性がある。本栽培実験において35℃で2種が枯死した一因であった可能性もある。また、葉の蒸散速度は全体的にヤエヤマヒルギよりオヒルギの方が低く、気温上昇に伴う蒸散速度の上昇傾向もヤエヤマヒルギよりオヒルギの方が抑えられていた（図4.3.14上段）。2種の気孔コンダクタンスの絶対値が同じ栽培温度下でそれほど変わらないことから（図4.3.14下段）、オヒルギの方が高温下における葉のクチクラ層の乾燥耐性が高いことを示唆している。このことも、35℃でオヒルギがヤエヤマヒルギより枯死する速度が遅かったことに反映されていた可能性がある。

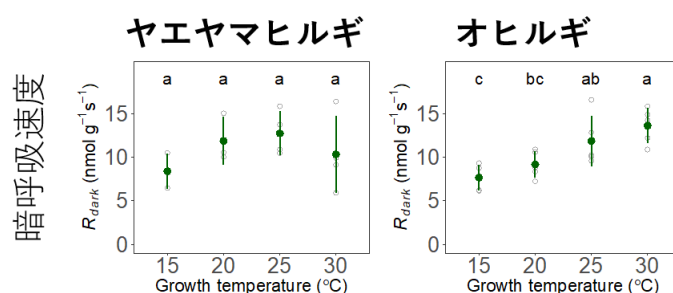


図4.3.15 ヤエヤマヒルギとオヒルギの栽培実験終了時の栽培温度での葉の暗呼吸速度と気温。図中の緑丸印は平均値を、白抜き丸印は個体ごとの生データを、エラーバーは標準偏差を、異なるアルファベットは温度間における統計学的な差があることを示す。N=10

栽培実験終了時の栽培温度における葉の暗呼吸速度の平均値は、ヤエヤマヒルギでは25°C、20°C、30°C、15°Cの順に高く、全ての栽培温度間で統計学的な差は認められなかった（図4.3.15）。一方、オヒルギでは、葉の暗呼吸速度の平均値は30°C、25°C、20°C、15°Cの順に高く、15°Cまたは20°Cと25°Cまたは30°Cとの間に統計学的な差が認められた。2種の純光合成速度（図4.3.13）と比較すると、2種とも、光合成で同化した炭素のおよそ半分をエネルギー生産のための呼吸代謝で消費していたことになる。25°Cから30°Cに気温が上昇した際の純光合成速度と暗呼吸速度の応答は2樹種とも対応関係が見られた。わずかな差であるが、ヤエヤマヒルギが30°Cで低下傾向を示したのに対し、オヒルギがわずかな増加または維持にとどまっていたことから、オヒルギの方がヤエヤマヒルギより高温耐性があることを窺わせる。

4.3.2.4 日中と夜間の気温差の影響

上記の実験により、30-35°Cの間に生残に影響を及ぼす影響が観察された。本実験では、ヤエヤマヒルギを用いて、日中と夜間の気温差の影響を検討した。日中の気温を31°Cまたは33°Cに設定し、それぞれ夜間の気温低下を3°Cまたは1°Cに設定したところ、日中の気温が33°Cで夜間との気温差が1°Cの場合に相対成長速度の低下が見られた（図4.3.16）。このことは、マングローブ植物の生残に及ぼす要因として、日中の気温と共に、日中と夜間との気温差も重要であることを示している。

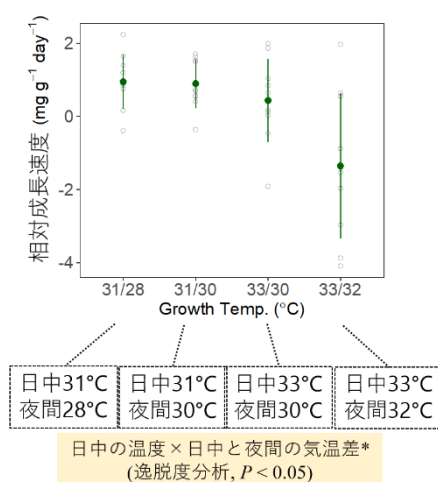


図4.3.16 日中と夜間の気温差がヤエヤマヒルギの相対成長速度に及ぼす影響。図中の緑丸印は平均値を、白抜き丸印は個体ごとの生データを、エラーバーは標準偏差を示す。N=10

栽培実験を開始してから3週目には、日中33℃夜間32℃の条件下で顕著な落葉が見られた。栽培実験終了時のヤエヤマヒルギの各器官の乾燥重量を見ると、葉の重量は日中の気温が31℃から33℃に上がると低下し、さらに夜間との気温差が1℃の場合は気温差3℃に比べて重量減少が大きかった（図4.3.17）。根のバイオマスは、日中の気温が31℃から33℃に上昇すると低下していたが、日中と夜間の気温差による違いは見られなかった。このことから、夜間の気温上昇の影響は根よりも葉に現れやすいことが明らかとなった。

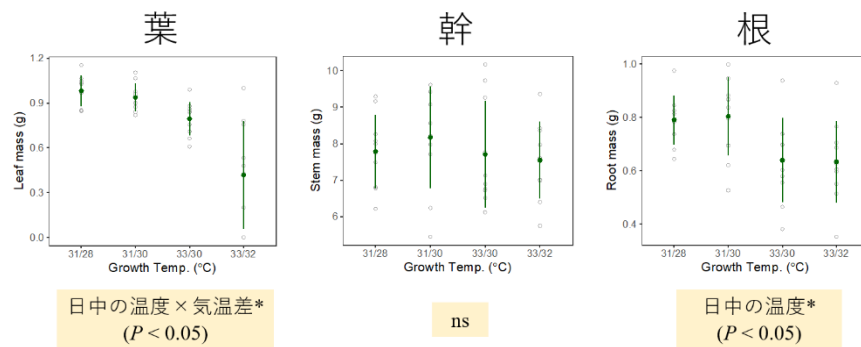


図4.3.17 日中と夜間の気温差がヤエヤマヒルギの各器官重に及ぼす影響。図中の緑丸印は平均値を、白抜き丸印は個体ごとの生データを、エラーバーは標準偏差を示す。N=10

また、栽培実験開始前に展開していた旧葉と実験開始後に展開した新葉では、個葉の形態が異なっており、日中の気温が上がると新葉の面積が小さくなることが明らかとなった。根の形態にも影響が見られ、日中の気温上昇は根長を低下させ、日中と夜間の気温上昇は細根割合を低下させることが明らかとなった。根の細根割合が低下することは、水分および養分吸収効率に直結するため、気温上昇が進行すると水分と養分の不足を引き起こし、植物の生残に影響を及ぼすことが予測される。

個葉の小型化や葉バイオマスの減少は、樹林全体として風波に対する抵抗を変化させることが予測される。さらに、根長や細根率の減少は個木の根付き強度を変化させると考えられるため、風波への抵抗や土壌侵食耐性が変化すると予測される。以上のことから、本実験により、気候変動に伴う温暖化はマングローブ樹林群の防波機能に影響を及ぼすことが示された。

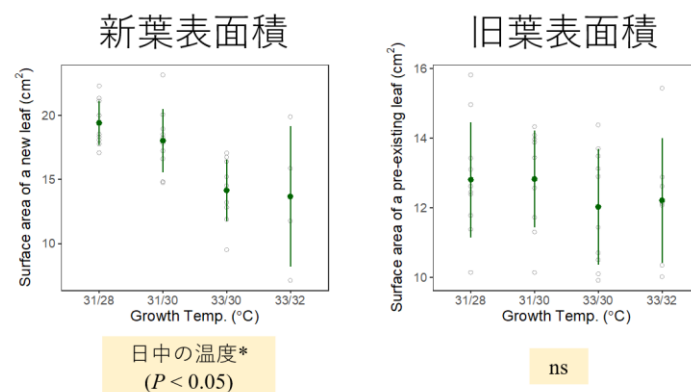


図4.3.18 日中と夜間の気温差がヤエヤマヒルギの個葉の形態に及ぼす影響。図中の緑丸印は平均値を、白抜き丸印は個体ごとの生データを、エラーバーは標準偏差を示す。N=10

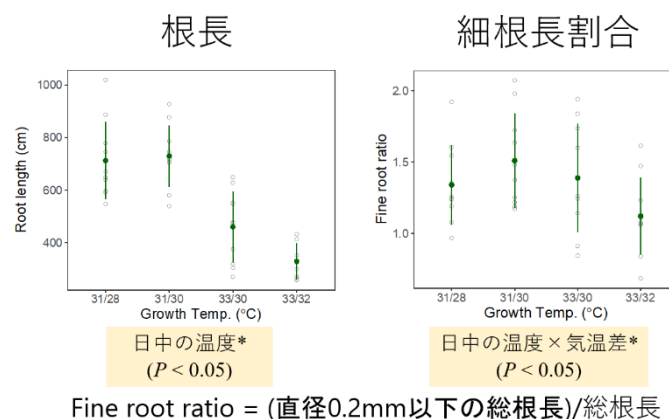


図4.3.19 日中と夜間の気温差がヤエヤマヒルギの根の形態に及ぼす影響。図中の緑丸印は平均値を、白抜き丸印は個体ごとの生データを、エラーバーは標準偏差を示す。N=10

4.3.2.5 生長と形態変化が沿岸保護機能に及ぼす影響

マングローブ植物は元来気温の高い熱帯亜熱帯地域に生育する植物であるため、気温上昇の影響を受けにくいという推察がなされることもあるが、本実験により、気候変動に伴う気温上昇が進行した場合、マングローブ植物の生残や成長、形態に影響が及ぶ可能性があることが明らかとなった。その影響は樹種の持つ温度応答特性によって異なることが予測される。フィリピンで植林されている主要樹種ヤエヤマヒルギとオヒルギの生長や形態変化は、本栽培実験における15°C-30°Cの気温処理に応答して変化していた。また、その応答メカニズムには葉の同化・代謝機構が深く関わっている可能性が示唆された。生長速度や形態は、植林後のグリーンインフラとしての沿岸保護機能を左右する重要因子である。本栽培実験におけるヤエヤマヒルギとオヒルギの最適生育温度（成長速度が最大の栽培温度）は25°C付近であった。今後より詳細な実験が必要であるが、現在の熱帯・亜熱帯の気温が上昇し続けた場合、マングローブ樹林群の持つ沿岸保護機能が低下する可能性がある。

4.3.3 グリーンインフラ事後評価

気候変動適応策としてのマングローブ植林（グリーンインフラ）を検討する際に、植林後の沿岸保護機能の経時変化を見積もることが出来れば、より具体的な事業計画を立てることが可能となる。そのためには、植林後の樹木の生長や形状に関するデータが必要となる。現在までに、気候変動適応策としてのマングローブ植林は、すでに様々な国や地域で進められているが、詳細な事後評価がされた事例は極めて少ない。そのことの一因として、植林をした際の記録が残されていないことが挙げられる。本課題では、過去15年間のマングローブ植林に関する詳細な記録が残されているキリバス共和国タラワ環礁のマングローブ植林地を用いて、植林後の樹木の生長や形態の変化を計測した。本来は、課題として焦点をあてているフィリピンで行うのが望ましいが、過去十分な期間の植栽記録が入手できたキリバス共和国での事後評価を行うこととした。植栽されていた樹種はフィリピンでもよく選定されているヤエヤマヒルギであった。



図4.3.20 キリバス共和国におけるマングローブ（ヤエヤマヒルギ）植林地
タラワ環礁アナナコーズウェイ

サンゴ環礁からなる標高の低いキリバス共和国タラワ環礁では、気候変動に伴う海面上昇への危機感から、2005年より沿岸保護を目的としたマングローブ植林が年に1-2回のペースで行われている（図4.3.21）。各林分の植栽年と植栽樹種、植栽密度の記録が残されていたので、2019年9月に各林分の毎木調査を行い、過去15年間の経時変化を計測した。



図4.3.21 キリバス共和国タラワ環礁におけるマングローブ（ヤエヤマヒルギ）植林地の様子

植栽は近隣の林から散布体を採集し、採集翌日に植林区画内に50cm間隔で植栽されていた。また、1か所の栽地穴に3本の散布体を植栽していた。開かれた干潟は日射が強く土壌温度が高くなりがちであり、植物にとっては乾燥と塩分ストレスが強くなることから、経験上50cm間隔3本植えの密植をすることで早い段階で地面が日隠されるようにしているとのことであった。また、植栽した林分が密に茂り、早い段階に成長が視認されることは、事業を行う地元住民のモチベーションを高め、植林事業を継続して進める上で重要であるとのことだった。調査地では過去15年間同じ手法で植栽が行われていた。

植栽後0-3年間は、散布体にフジツボが付着するなどして枯死してしまう様子が見て取れた。また、地盤高が低い場所では、植栽した半年後には全ての個体が枯死していた。わずかな地盤高の低下による冠水・高塩分ストレスが要因であると考えられる。およそ5年目以降になると繁殖器官である花卉や結実が見られた。また、散布体が結実している全ての林分の林床には、植栽された親木から散布された実生の更新が認められた。このことから、植栽初期を生残出来れば、順調に成長し、次世代更新の散布体供給源となりうるということが明らかとなった。

植栽後の樹高の経時変化は概ね直線的であった（図4.3.22左図の白丸）。調査地は林分間の土壌環境の変化が少ないと推察される単調な地形であったが、樹高の生長速度に2系統見受けられた。また、経過年と共に、支柱根の位置も高くなっており、その経時変化も概ね直線的であった（図4.3.22左図の灰色丸）。幹直径としては、支柱根の直上で計測したが、経過年と共に直線的に増加していることが認められた。樹高変化には成長速度が早い場所と遅い場所が見られたのに対し、幹直径にはそのようなパターンは見られなかった。このことから、土壌環境は幹直径よりも樹高に、より敏感に反映されることが窺える。樹高速度を規定する環境要因としては、塩分ストレスや養分状態、冠水状態などが考えられる。樹高成長や肥大成長は、林木密度や養分環境などに影響されると考えられるので、植栽地ごとにパラメ

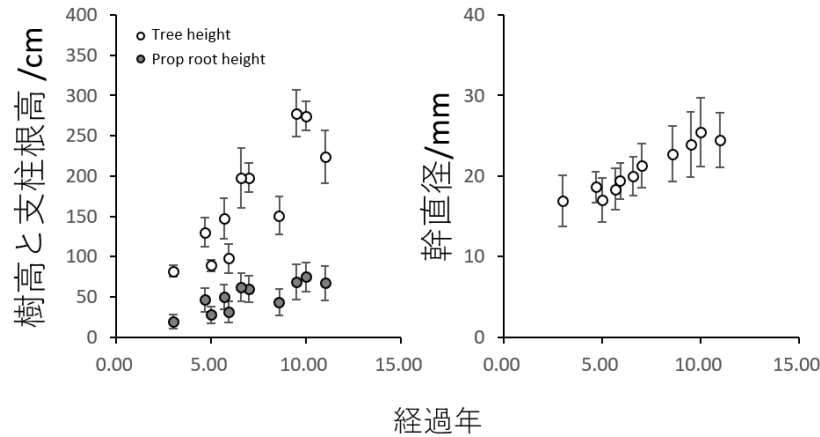


図4.3.22 マングローブ（ヤエヤマヒルギ）植林後の樹高・支柱根高・幹直径の経時変化
○印は各林分の平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。N=60

ータを計測し評価する必要があることに留意する必要がある。

本調査地の植栽樹種であるヤエヤマヒルギはアーチ状の地上根（支柱根）を作る（図4.3.22）。個木が支柱根を張る水平方向の広がりを「根張り」として計測したところ、植栽経過年に伴って根張り範囲が広がっていた。またその変化は概ね直線的であった（図4.3.23左図）。また、「支柱根直径」として地上20cmの支柱根の直径を計測したところ、詳細経過年に伴って増加していることが明らかとなった（図4.3.23中図）。植栽12年目の林分で急激な増加が見られるが、この林分は他の林分よりも人家に近い位置関係にあったため、生活排水などに由来する無機・有機養分などの影響を受けていた可能性があるが、本課題では詳細の検討に至らなかった。支柱根の数も、緩やかであるが植栽経過年に伴って増加する傾向が認められた（図4.3.23右図）。

支柱根の発達は、林内の構造を複雑化させ、樹林内を通る風波への抵抗を増大させる。したがって、上記の支柱根形状の経時変化データは、マングローブ林の防波機能の具体的な経時変化予測に貢献する。しかし、根張り幅や支柱根の発達は、林木密度や養分状況などに影響されると考えられるので、植栽地ごとにパラメータを計測し評価する必要があることに留意する必要がある。

本調査地のように、過去10-15年ほどの期間の植栽情報が分かっている林分があれば、その地域におけ

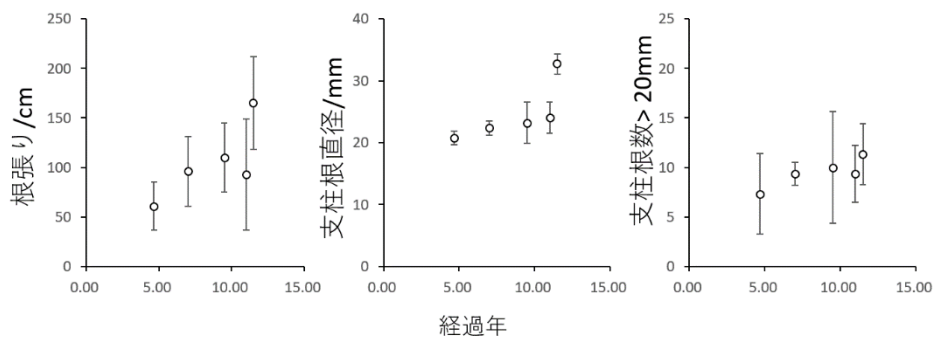


図4.3.23 マングローブ（ヤエヤマヒルギ）植林後の根張り・支柱根直径・支柱根数の経時変化。○印は各林分の平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。N=60

るマングローブ植物の形態・成長の経時変化を追うことが可能であることが明らかとなった。得られたパラメータによるマングローブ樹林群の防波機能モデルを使用すれば、より具体的な適応計画につなぐことが出来る。

5. 本研究により得られた成果

マングローブの植生とライフサイクルについて現地調査を温室実験について取りまとめた。また、気候変動に伴う環境変化が生育へ与える影響の中で、温度耐性について温室実験をもとに検討した。

(1) 科学的意義

- ・フィリピン全土の地形類型化とマングローブ分布整備を行うことで、台風や高潮・高波等の沿岸災害に対するグリーンインフラが効率的に行える地域の抽出が可能となった。
- ・気温に対するマングローブ植物の生育と形態応答を明らかにした。これにより、気候変動に伴う気温上昇がマングローブ植林による沿岸保護機能に及ぼす影響を評価できるようになった。
- ・すでに植栽されたマングローブ植林地における事後評価計測を行うことで、マングローブ植栽後の防波機能の経時変化が評価できるようになった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

「特に記載すべき事項はない。」

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・熱帯・亜熱帯沿岸生態系ポータルサイト (Tropical Coastal Ecosystems Portal <http://www.nies.go.jp/TroCEP/index.html>) において、作成した生態系分布マップと生物情報データを公開することで、環境政策における沿岸生態系情報活用の推進に貢献した。同サイトは環境省ホームページ「我が国の環境政策に関するポータルサイト、日本の環境政策」からもリンクされている。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) 協力案件名 : Mangrove plantation for coastal protection to enhance mangrove biodiversity and to generate income for the local community, Gujarat, India (インド国グジャラート州における海岸侵食防止と地域住民の収入確保のためのマングローブ植林)
カウンターパート : Daheda Sangh (インド現地 NGO) (インド)
- 2) 協力案件名 : Rehabilitation of degraded mangroves to restore biodiverse mangrove ecosystems, Sabah, Malaysia (マレーシア・サバ州における生物多様性に富んだマングローブ生態系再生のための劣化したマングローブ林の回復)
カウンターパート : Sabah Forestry Department, Malaysia (マレーシア)
- 3) 協力案件名 : Mangrove rehabilitation to introduce mangrove planting techniques and to mitigate coastal erosion
カウンターパート : Ministry of Environment, Land and Agriculture Development, the Republic of Kiribati (キリバス共和国)
2016年にキリバス共和国とのMOUを締結
- 4) 研究協力案件名 : Evaluating the functions of coastal ecosystems for climate change mitigation and adaptation (沿岸生態系機能評価に関する現地調査と分析)
カウンターパート : Dr. Nick Rollings, The University of the South Pacific, Suva, Fiji
フィジー
2016年にフィジー国とのMOUを締結
- 5) 研究協力案件名 : To co-organize International conference on sustainable mangrove ecosystem: Managing a vital resource for achieving SDGs and Paris Agreement, April, 2017, Bali, Indonesia (2017年4月にインドネシアのバリで開催される持続可能なマングローブ生態系に関する国際会議ー持続可能な開発に関する目標とパリ協定を達成するための活力ある資

源の管理－開催への協力)

約250名26カ国が参加

カウンターパート：International Tropical Timber Organization (ITTO, Ministry of Environment and Forestry, Indonesia インドネシア

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上发表

<論文(査読あり)>

- 1) T. INOUE T: T. KUWAE and M. HORI eds. Blue carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy, and Implementation, Springer, pp.373(2018), Carbon Sequestration in Mangroves.
- 2) 熊野直子、田村誠、井上智美、横木裕宗：土木学会論文集G(環境)、74, 5(巻, 号), I_395-I_404(2018), フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果
- 3) Y. AKAJI, T. INOUE, H. TOMIMATU, A. KAWANISHI: Trees, DOI 10.1007/s00468-019-01840-7 (2019), Photosynthesis, respiration, and growth patterns of *Rhizophora stylosa* seedlings in relation to growth temperature.
- 4) H. YAMANO, T. INOUE, H. ADACHI, K. TSUKAYA, R. ADACHI and S. BABA: Estuar. Coast. and Shelf. Sci., 220(vol), 166-175 (2019), Holocene sea-level change and evolution of a mixed coral reef and mangrove system at Iriomote Island, southwest Japan.
- 5) T. INOUE, A. KHOZU, and A. SHIMONO: Tree Physiol., DOI: 10.1093/treephys/tpz088 (2019), Tracking the route of atmospheric nitrogen to diazotrophs colonizing buried mangrove roots.
- 6) T. INOUE, A. SHIMONO, Y. AKAJI, S. BABA, A. TAKENAKA and H.T. Chan: Annal. Bot., DOI: 10.1093/aob/mcz164J, (2020), Mangrove-diazotroph relation on root, tree and forest scales-Mangrove plants create high soil nitrogenase activity with unique diazotrophic communities.

<その他誌上发表(査読なし)>

- 1) 島谷幸宏他編：図説日本の湿地、朝倉書店、84-85(2017) 「2-23 熱帯・亜熱帯の森マングローブ(執筆担当：井上智美)
- 2) 小池一之、山下脩二、岩田修二、漆原和子、小泉武栄、田瀬則雄、松倉公憲、松本淳、山川修治編：自然地理学事典 サンゴ礁の島々に迫る危機、朝倉書店、404-405(2017) 「地球温暖化に伴う海面上昇(執筆担当：山野博哉)
- 3) 山野博哉、水生生物に及ぼす気候変動の影響：用水と廃水、59, 68-73(2017)
- 4) 山野博哉、俯瞰と超学際：広がる環境問題の理解と解決のためのアプローチ：科学、188, 153-156(2018)
- 5) 山野博哉、これからどうなる？ 世界と日本のサンゴ礁：自然保護、1562, 32-33(2018)
- 6) 山野博哉、学術研究に基づいた自然環境分野の気候変動適応：国立公園、1761, 13-15(2018)

(2) 口頭発表(学会等)

※発表済みのもの又は確実に発表する予定のものにとどめてください。

- 1) T. INOUE, S. BABA, F. ISHIHAMA, A. KAWANISHI, F. HAYASHI, N. OHSHIRO, M. KEZUKA, Y. MOCHIDA, H. T. CHAN, M. KAINUMA, N. KIMURA, H. YAMANO, T. KUWAE and H. MATSUDA: International Conference on Sustainable Mangrove Ecosystems, Bali, Indonesia, 2017
“Carbon storage of mangrove ecosystems: estimated models and global maps applied their models.”
- 2) T. INOUE: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“Function of mangrove plants-Roots and soil chemicals.”
- 3) H. YAMANO and T. INOUE: Environmental Scientists Network for Asia-Pacific Islands, Okinawa, Japan, 2017
“Conservation and evaluation of the functions of coastal ecosystems for ecosystem-based management of tropical and subtropical islands.”
- 4) 井上智美、川西あゆみ、富松元：日本生態学会第64回大会（2017）
「マングローブ植物（メヒルギ）の呼吸特性」
- 5) 赤路康朗、井上智美、富松元、川西あゆみ：中国四国地区生物系三学会合同大会（2018）
「生育温度がヤエヤマヒルギ実生の生残・成長・光合成に与える影響」
- 6) H. MOKI, A. SOHMA, H. SHIBUKI, K. TOYODA, A. AKHAND, K. WATANABE, T. TOKORO, T. INOUE, H. YAMANO, M. MANNNO, Y. NAKAYAMA, H. MATSUDA and T. KUWAE: JpGU-AGU Joint Meeting 2018, Chiba, Japan, 2018
“The Estimation of CO₂ Flux in Subtropical Coastal Ecosystems Using a Numerical Model.”
- 7) 熊野直子、田村誠、井上智美、横木裕宗：第26回地球環境シンポジウム（2018）
「フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果」
- 8) M. TAMURA, N. KUMANO, T. INOUE, H. YOKOKI: Hanoi Forum 2018, Hanoi, Vietnam, 2018
“Impact and cost assessment of coastal protection mixing green infrastructure against sea level rise in Vietnam.”
- 9) 下野綾子、井上智美：第一回環境 DNA 学会（2018）
「マングローブ根圏に形成される窒素固定細菌群集」
- 10) 赤路康朗、井上智美：日本生態学会第66回大会（2019）
「日中および夜間の生育温度上昇に対するヤエヤマヒルギ実生の形態的・生理的变化」
- 11) 井上智美、高津文人、下野綾子：日本生態学会第66回大会（2019）
「マングローブ植物への新たな窒素供給経路の検証—呼吸根通気システムと窒素固定菌」
- 12) 宮城豊彦、馬場繁幸、井上智美、赤路康朗、趙学群：第25回日本マングローブ学会大会（2019）
「全規模ダイレクトセンシングによるマングローブ林分分布状況把握の可能性と意義」
- 13) N. KUMANO, M. TAMURA, T. INOUE, H. YOKOKI: 2019 AGU Fall Meeting, Moscone west, San Francisco, 2019
“Estimating the cost of coastal protection using mangrove forests against sea level rise in the Philippines and Vietnam.”
- 14) 森岡たまき、小山里奈、黒岩恵、井上智美、松尾奈緒子、大手信人：日本生態学会大会第67回大会（2020）
「低酸素状態のマングローブ根圏で硝化は起きているのか？-植物と土壌微生物の相互作用」
- 15) 井上智美、野口航、赤路康朗：日本生態学会大会第67回大会（2020）
「マングローブ植物の葉と根の呼吸温度依存特性」
- 16) A. SHIMONO and T. INOUE: The 67th Annual Meeting of the Ecological Society of Japan, Nagoya 2020 (ESJ67), 2020
“Rhizophore diazotrophic communities developing with mangrove forest formation.”
- 17) Y. AKAJI, T. INOUE, T. TANIGUCHI, S. BABA: The 67th Annual Meeting of the Ecological

Society of Japan, Nagoya 2020 (ESJ67), 2020

“Arbuscular mycorrhizal fungi associated with the roots and soils of two Rhizophoraceae species.”

- 18) L. A. KOYAMA, T. INOUE and N. MATSUO: OrgN2020, International workshop on organic nitrogen and plant nutrition - from molecular mechanisms to ecosystems, Monte Verità, 2020

“Capacity of two mangrove species, *Bruguiera gymnorrhiza* and *Rhizophora stylosa*, to use nitrate as a N source.”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「中学生・高校生によるマングローブ研究発表となんでも相談」（主催：日本マングローブ学会、2019年12月8日、東京農業大学世田谷キャンパス、観客約100名）にて司会進行・質問回答
- 2) 地域の科学講座（主催：自愉企画）における講師「熱帯の海の森」（2019年11月4日、参加者約10名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-4 マングローブ波浪低減効果の把握

学校法人 東北学院大学
 教養学部地域構想学科
 人間情報学研究所

柳澤英明
 宮城豊彦

平成29(開始年度)～令和元年度研究経費(累計額)：14,904千円(研究経費は間接経費を含む)
 (平成29年度：4,788千円、平成30年度：5,059千円、令和元年度：5,056千円)

[要旨]

本研究では、現地調査および空中写真判読からマングローブ林の形状特性や成長・森林拡大率について明らかとするとともに、水理模型実験と数値シミュレーションを実施することで、マングローブ林の波浪低減効果について定量化を行った。

本研究ではマングローブの抵抗特性を評価するうえで重要となる樹木形状を把握するため、非接触型の測量方法である3Dスキャナを用い高精度かつ効率的な形状測量調査を行った。この結果、これまで十分な評価ができなかったマングローブ特有の複雑な支柱根形状を3Dデータ化することに成功し、支柱根の投影面積や体積などの形状特性を鉛直分布関数として定式化することができた。またマングローブの成長に応じた形状変化を検討するために、ベトナムや西表島を対象に樹齢の異なるマングローブ林で毎木調査を実施し、成長曲線を作成した。さらに空中写真判読および現地調査より、マングローブ林の拡大速度の算定と森林拡大に伴う樹種の交代特性について明らかとした。これにより、マングローブの成長や森林の拡大に関するシナリオを構築することが可能となった。

さらに本研究では、3Dプリンター技術を応用してマングローブの高精度模型を作成し、段波の水理模型実験を実施した。その結果、林帯幅1.5m(実スケール15m)のマングローブで段波の水位を10%程度減衰できることが分かった。また、マングローブ模型による水理模型実験(段波)についての再現シミュレーションを行い、数値モデルの精度検証をおこなった。この数値モデルを利用することで、マングローブ林の成長シナリオに対する段波減衰特性について定量評価することが可能となった。

[キーワード]

波浪低減効果、3Dスキャナ、成長曲線、水理模型実験、数値シミュレーション

1. はじめに

潮間帯に成立するマングローブ森林生態系には、海洋からのインパクトを真っ先に受けとめ、陸側に広がる人間環境を保全する機能が期待される。しかし、海側からのインパクトに対するマングローブの減勢効果を定量化していくには未だ課題が多く、その機能を効率的に活用するまでには至っていないのが現状である。本研究では、人間社会に激甚なインパクトをもたらす高潮や津波災害に着目し、現地調査(3Dスキャナ測量、毎木調査)と空中写真判読から、マングローブの形状特性および成長率を定式化するとともに、水理模型実験と数値シミュレーションモデルを用いて波浪減衰効果を定量化する。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、マングローブにおける支柱根形状を測定してモデル化する。このため、マングローブの植生調査を実施するとともに、高精度3Dスキャナおよび3Dプリンタ技術を活用し、マングローブの3Dモデルを作成する。マングローブ林内における波浪減衰特性を明らかにするため、複雑に密集するマングローブ林の3D模型を作成し、段波水槽による水理模型実験を行う。さらに数値モデルにより、マングローブ林の波浪減衰効果について段波を対象に定量化する。

3. 研究開発方法

本研究では、(1) 現地調査による形状特性と成長変化の定式化 (2) 空中写真判読による森林拡大率の推定 (3) 水理模型実験および数値シミュレーションモデルによる波浪低減特性の把握、そして(4) 成長シナリオに対する段波減衰特性の定量評価を行った (図3.4.1)。それぞれについての研究開発方法の詳細を以下に示す。

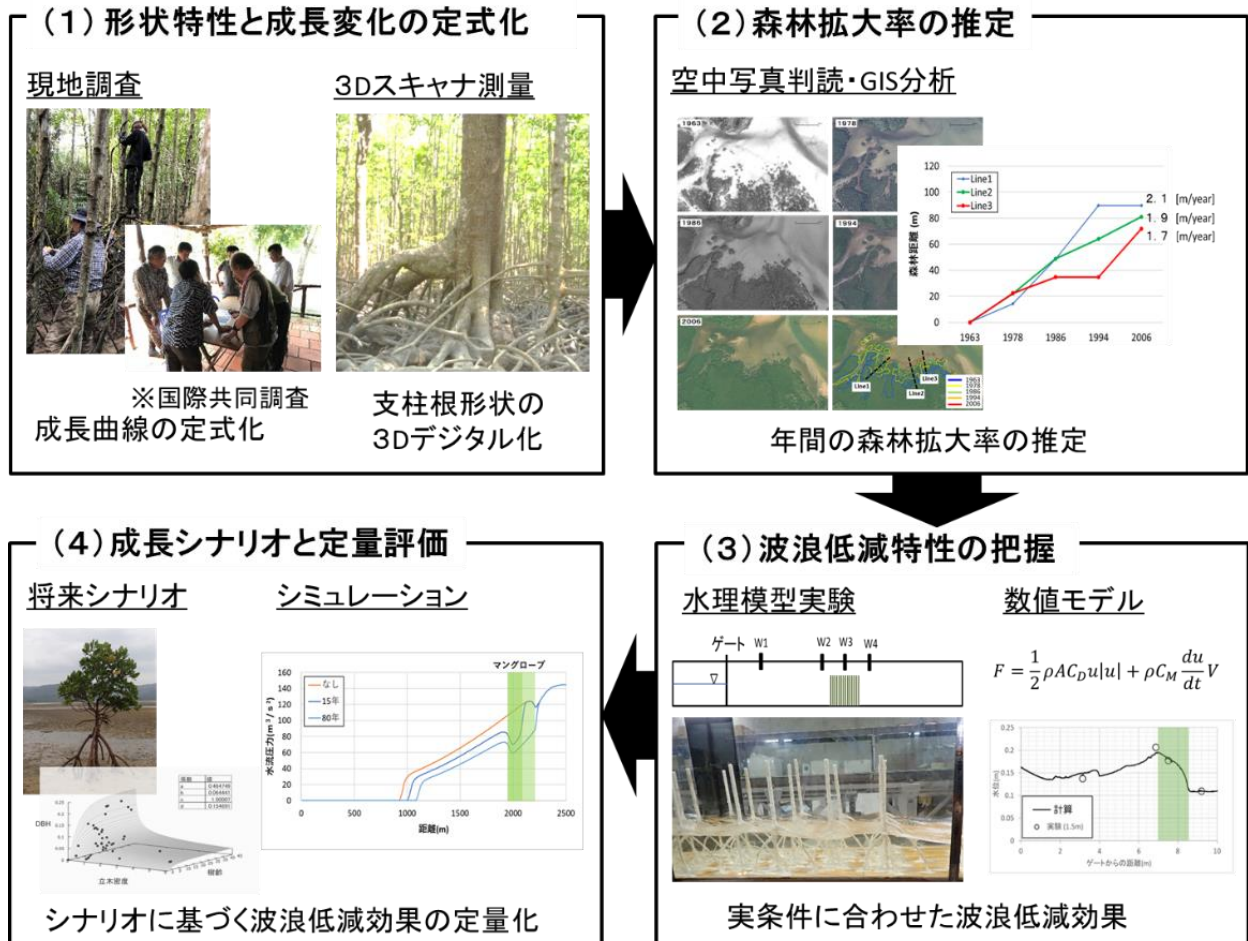


図3.4.1 サブテーマ4における研究開発方法の概要

(1) 現地調査による形状特性と成長変化の定式化

① 3Dスキャナ測量による形状評価の方法

近年、3Dスキャナによる非接触型の形状測量が盛んにおこなわれるようになってきた。この技術をマングローブの形状測量に適用することで、複雑に絡み合う支柱根の構造や体積などを正確に把握することができるようになると期待される。しかしながら、これまで3Dスキャナをマングローブ測量に適用した事例がなく、マングローブ森林内の困難な測量環境において効率的かつ高精度な評価が可能であるかどうかの検証はされていない。そこで、本研究では樹齢の異なるマングローブの支柱根を対象に3Dスキャンを行い、精度検証を行う。さらにスキャンングにより得られた3Dデータを用いて支柱根の投影面積や体積の鉛直分布特性を明らかとする。

今回の計測では携帯性に優れたDotProduct社製DPI-8Xハンディスキャナー を利用した (図3.4.2)。DPI-8Xは、PrimeSense(Apple)社製のPrimeSense Carmine1.08センサー による赤外線カメラとRGBカメラを使用して、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術によって形状測定をする3Dスキャナで、計測範囲は0.8~3.5mである。また一回の測定で全体をスキャンすることができない場合でも、測

定を分けて複数の画像をつなぎ合わせる事が可能となっている。本研究では、黒と白のモザイク模様
のマーカ―を根や幹に設置した(図3.4.2)。一方、PrimeSenseセンサーの弱点として、室内での利用を
目的としているため太陽光に弱く、強い日光が差し込む場所では十分な計測ができない。マングローブ
森林内でも、太陽光が多く差し込む場所や時間帯では、精度が低下したり、想定以上にスキャンに時間
がかかったりする場合がある。そのため、太陽光が多く差し込む場所で計測を実施したい場合には、日
の出や日の入りあたりの時間帯を使うのが望ましい。本研究では、日射が強い時間帯には傘で日陰を作
りスキャンを行った。

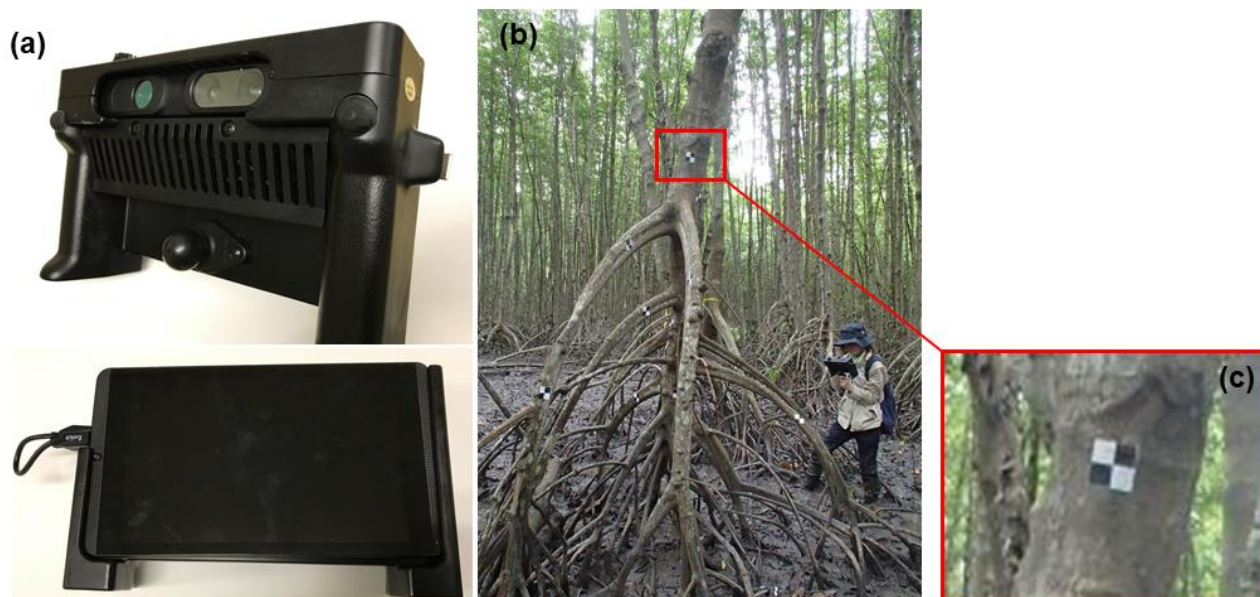


図3.4.2 (a) DPI-8Xハンデイスキャナー (b) マングローブの3D計測時の様子 (c) マーカ―

② 毎木調査と成長曲線の作成方法

西表島およびベトナム・カンザー地区で植林されたマングローブ林(*Rhizophora*属)を対象として毎木
調査を行った。毎木調査では主に、樹高、下枝高、胸高直径・株元径、根高、根張りについて計測を行
った(図3.4.3)。また成長曲線の定式化に当たって、樹齢、立木密度、胸高直径をパラメータとした回
帰分析を実施した。本研究では、回帰式としてミッチャーリヒ式と累乗式を組み合わせた以下の式を新
たに提案した。

$$D = \frac{b}{N^a} (1 - c \exp(-dt))$$

ここで、 D は胸高直径(m)、 a 、 b 、 c 、 d は係数、 t は樹齢(年)、 N は立木密度(本/m²)である。近似計算は、
レーベンバーグ・マーカート法による非線形最小二乗法で実施した。本検討では、現地調査で得られた
データに加え既往研究で得られているデータを合わせることで、汎用性の高い近似曲線を作成する。

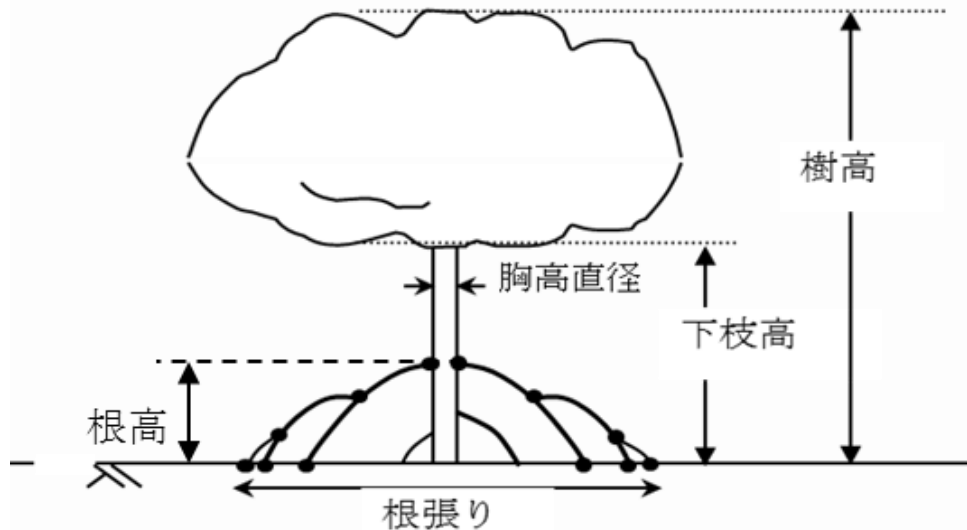


図3.4.3 毎木調査における測量項目

(2) 空中写真判読による森林拡大率の推定方法

マングローブ林を撮影した複数の年代の異なる空中写真をGIS（地理情報システム）で重ね合わせることでマングローブ林の拡大に関する経時変化を評価した。ここでは、過去の空中写真が充実している西表島浦内川河口部を対象とした。浦内川では、国土地理院地図により1963年、1978年、1984年、1994年、2006年に撮影された空中写真が公開されている。また本研究では、Google Mapによる衛星画像および、現地調査でのドローンによる空撮画像を用い、森林の位置情報や分布状況について確認を行いながら以下の方法で作業を進めた。まず、1963年から2006年までの空中写真をQGIS上のラスターデータの「ジオリファレンサー」機能を用いて現在の地図（Google Map）に重ね合わせた。この際、特徴のある道路や地形、森の形などの特徴点を参考に位置情報を追加した。空中写真が不明瞭な場合には、画像精度の良いドローン画像で特徴点の存在を確認しつつ作業を進めた。重ね合わせた後、各年代の画像における森林のエッジにラインを引いて、森範囲の変化を比較した。

(3) 水理模型実験および数値シミュレーションモデルによる波浪低減特性の把握

① 水理模型実験の方法

水理模型実験を行うため、本研究では（1）でスキャンニングしたマングローブ3Dデータより、3Dプリンター（Mutoh社製MF-2200D）を用いて、1/10スケールの高精度模型を作成した（図3.4.4）。MF-2200は熱で溶かしたプラスチックを積み上げていく熱溶解積層方式の3Dプリンターで、最小0.05 mmの層厚で印刷することが可能である。しかしながら、積層が細くなると印刷に多くの時間を要してしまうため、本研究では0.3mmの積層で印刷を行った。そのため今回の模型には0.3 mm程度の誤差が生じている可能性がある。マングローブ模型の配置では、現地条件に合わせて立木密度83本/m²とし千鳥配置で設置した。マングローブの林帯幅としては、1.0 mと1.5 m（現地スケール：10 mと15 m）の2ケースを設定した。

本研究では、水理模型実験の水槽として油圧式段波水槽（長さ17m、幅30cm）を利用した（図3.4.5）。この実験水槽では、油圧式ゲートを急開させタンクにためた水を一気に流すことで、高潮や津波時に発生する段波を模した波を発生させることができる。作用外力としてタンクの水位を15cm、20cm、25cm、30 cm、40cmと水位を変えて計測を行った。また水位計は段波発生直後、模型前面、中央、背後の4点に設置した。

② 数値シミュレーションモデルの概要

本研究では、実験水槽で発生させた段波を再現する波浪モデルとして、マニング粗度を考慮した非線形長波方程式を利用した。またマングローブ林内の波浪減衰効果を再現するための抵抗則には、抗力項と慣性力項を考慮したモリソン式を利用する。数値シミュレーションモデル内で定義されるマングローブ林の投影面積および体積は、前項で作成した3Dデータから算定した。

(4) 成長シナリオに対する段波減衰特性の定量評価

上記(1)と(2)の研究成果に基づいて、マングローブ林の成長シナリオに応じた形状および森林面積の経時変化を推定する。成長シナリオに対して、(3)で開発した数値シミュレーションモデルを用いてマングローブ林による段波低減効果の定量評価を行った。

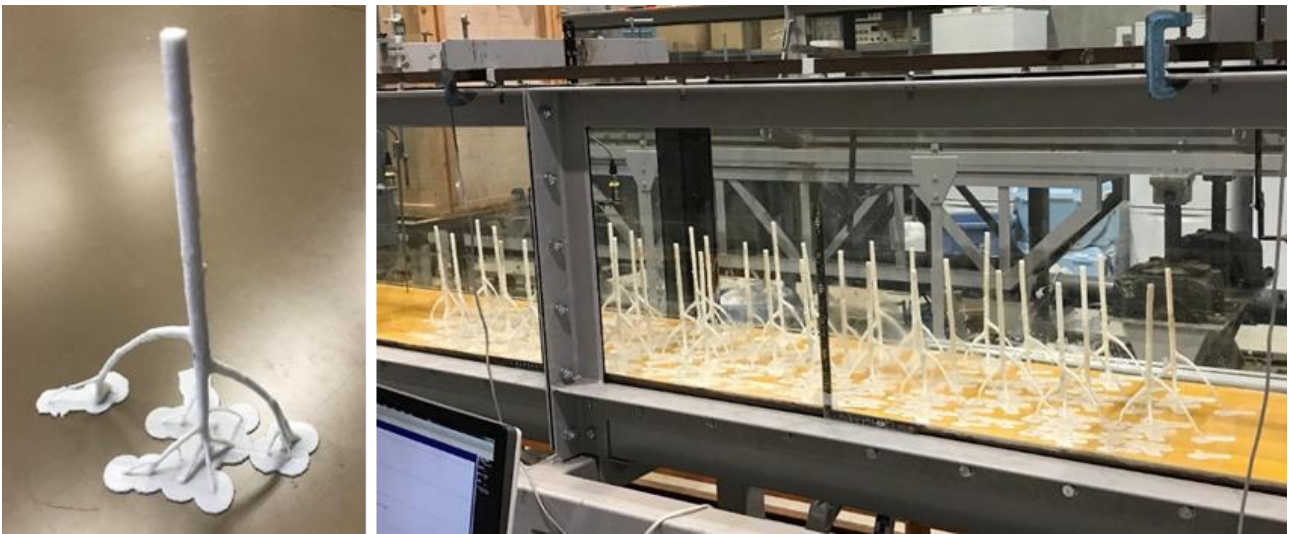


図3.4.4 3Dプリンターで作成したマングローブ模型

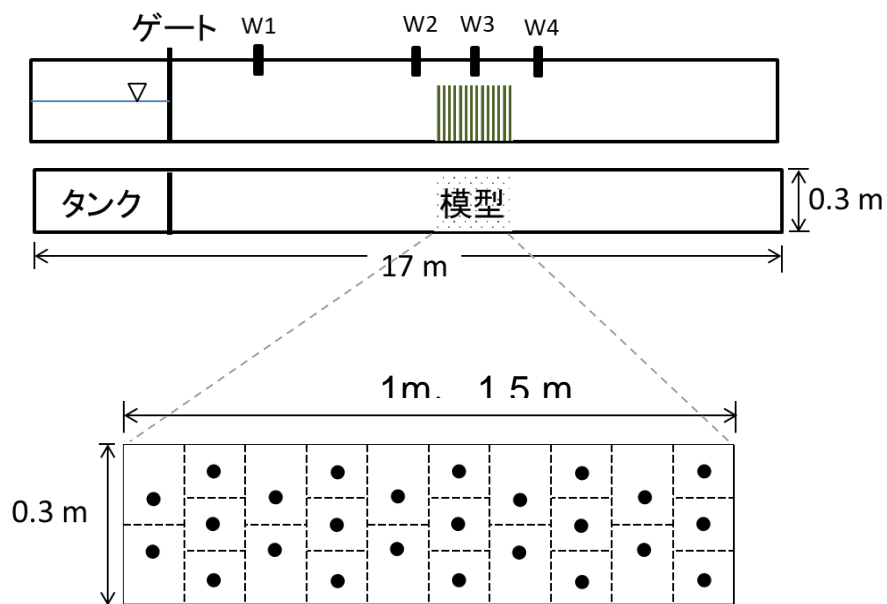


図3.4.5 段波水槽の概要

4. 結果及び考察

マングローブにおける支柱根形状を測定してモデル化するため、ベトナム等においてマングローブの植生調査を実施した。現地調査結果をもとに、高精度3Dスキャナおよび3Dプリンタ技術を活用し、マングローブの3Dモデルを作成した。複雑に密集するマングローブ林の3Dモデルを作成し、段波水槽による水理模型実験を行い、マングローブ林の波浪減衰特性を明らかとした。また数値モデルにより、マングローブ林の段波減衰効果について定量化した。計画通りの成果を得た。

(1) 現地調査による形状特性と成長変化の定式化

① 3Dスキャナ測量による形状評価

ベトナム・カンザー地区において1998年(19年生)と1978年(39年生)に植林されたマングローブ林(*Rhizophora apiculata*)を対象として調査を行った。毎木調査より、各地点における森林の平均胸高直径および立木密度はそれぞれ7 cm, 0.66本/m²と17cm, 0.16本/m²であった。本研究では、それぞれの森林内で平均的な大きさに近い樹木を選定し3D計測の対象とした。

図4.4.1に19年生と39年生のマングローブの3Dスキャン結果と写真を示す。写真との比較から、3Dデータが支柱根位置や細かい節の部分まで良く再現していることがわかる。3Dデータによる19年生と39年生のマングローブの株元径はそれぞれ8cmと26cmで、巻き尺による測定結果とほぼ同じ値であり、主幹については1cmより小さい誤差で評価できることが分かった。主幹以外の要素については実測における基準点が不明瞭であったため、直接の比較が難しいがおおむね同程度の値となっている(表4.4.1)。以上より、3Dスキャナによる計測は支柱根などの形状測定に有効であることが確認できた。

本研究では、主幹上で最も高い地点から出ている根の高さから地面までを支柱根全体と考え体積を算定した。その結果、3Dデータから19年生のマングローブの支柱根部の体積は0.0078m³、39年生は0.19m³となった。この結果より、両者にはおよそ24倍の体積差があることが分かった。さらに図4.4.2には体積の鉛直分布を示す。これによると根高の4分の1までの体積が際立って大きくなっていることがわかる。底面付近に自重を集中させることで、軟弱地盤でも安定して立地できる構造となっていると考えられる。また体積の累積分布に関しては、ほぼ放物線で近似されることがわかった。

② 毎木調査と成長曲線の作成

ベトナムおよび西表島におけるマングローブの毎木調査からマングローブの基本形状の測定と成長状況の把握を行った。図4.4.3に基本形状の測定結果を示す。樹高および下枝高と胸高直径の関係について良い相関関係を確認することができた。一方で、根の形状についてはばらつきが大きい結果となった。次に、この非線形回帰分析に基づいて得られた成長曲線を図4.4.4に示す。これによると、実測値と近似曲線による予測値の重相関係数は0.89、RMSEは0.025であり、高い精度で近似できていることがわかる。

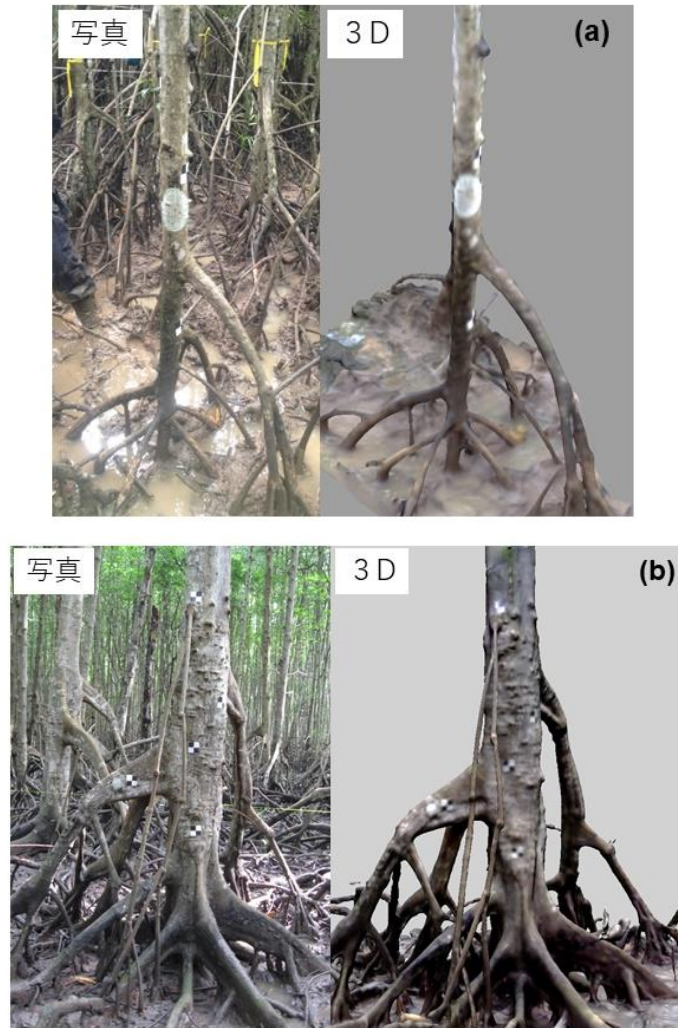


図4.4.1 マングローブ (*Rhizophora* sp.) の写真と3Dモデルの比較.
 (a) 1998年と (b) 1978年に植林した森のマングローブ

表4.4.1 マングローブの3Dモデルとメジャーによる測定値の比較 (単位:m)

測定項目	1993年生のマングローブ		1978年生のマングローブ	
	メジャー測定	3Dモデル	メジャー測定	3Dモデル
株元径	0.08	0.08	0.26	0.26
根高	1.10	0.99	1.70	1.67
根張り※	2.0	1.64	3.6	3.47

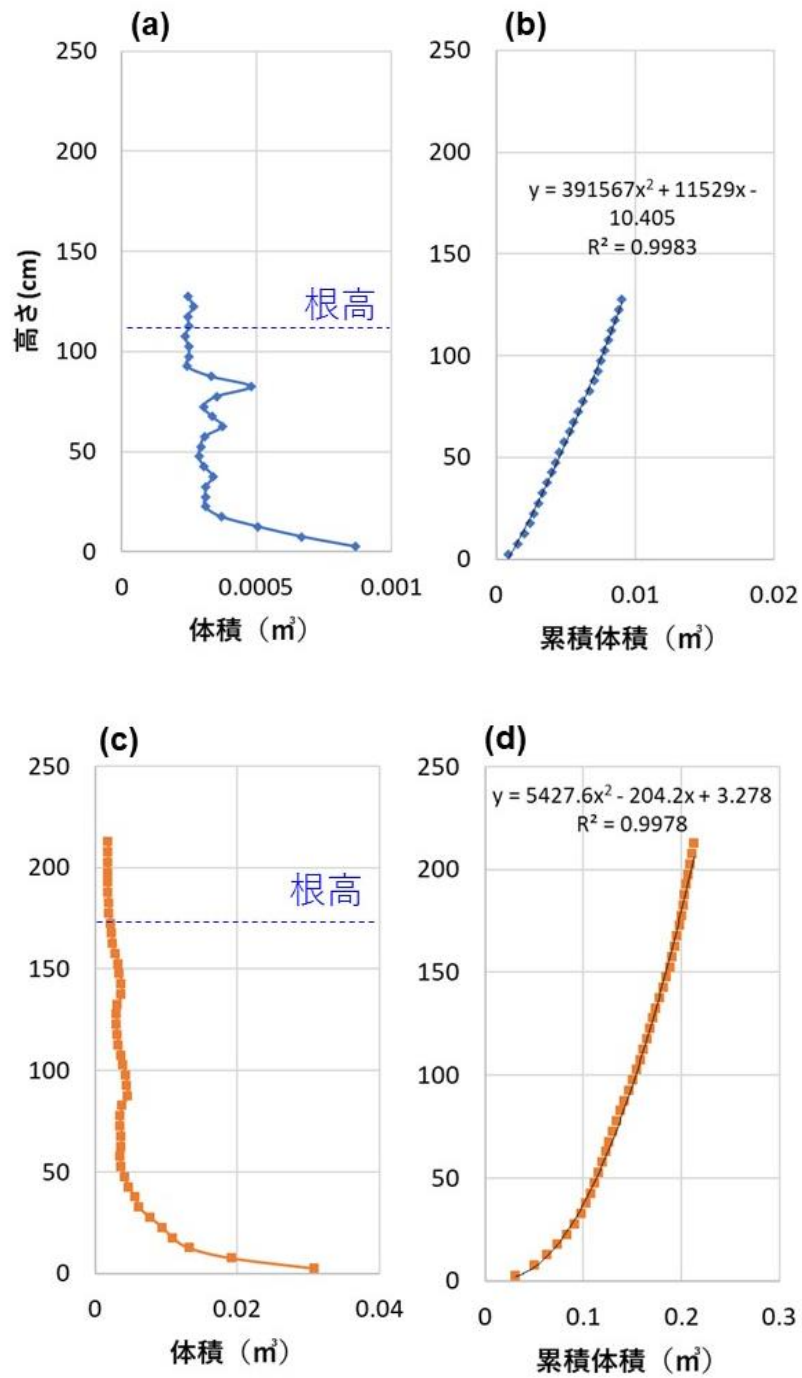


図4.4.2 体積の鉛直分布および累積分布 (a) (b) 19年生 (c) (d) 39年生

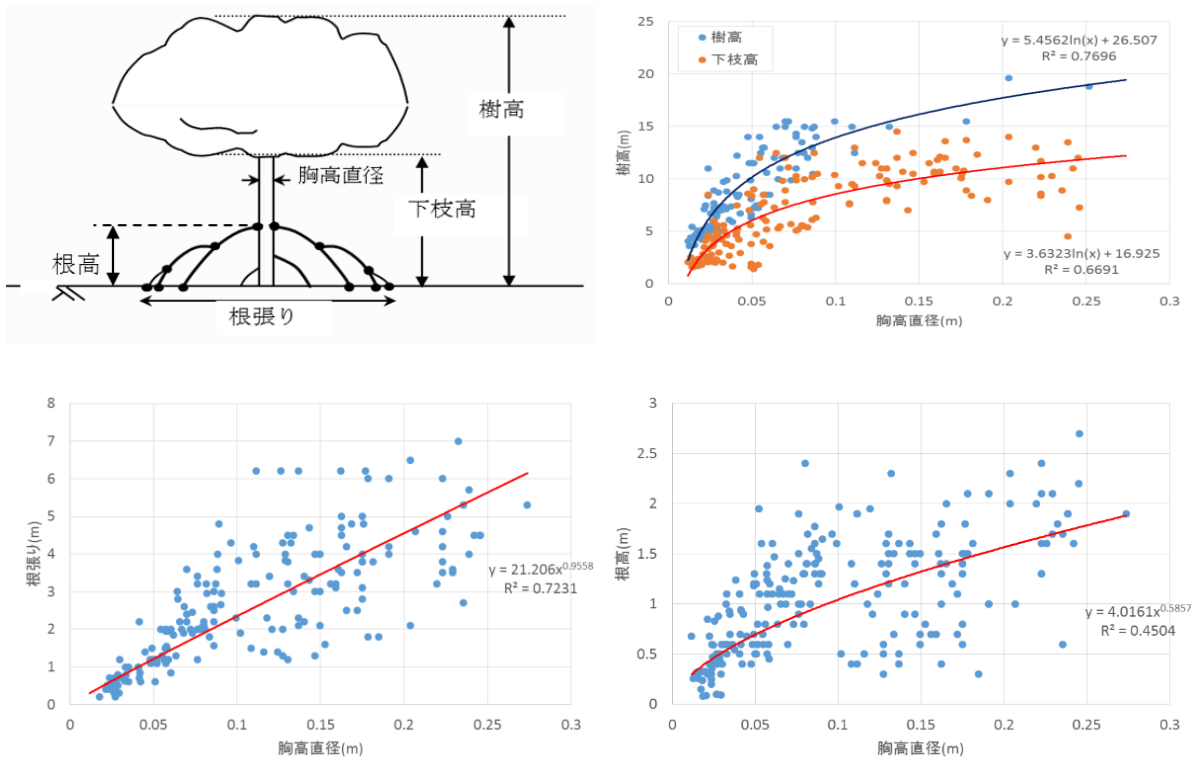


図4.4.3 (a) 測定項目. 胸高直径 vs (c) 樹高および下枝高の関係 (b) 根張り (c) 根高

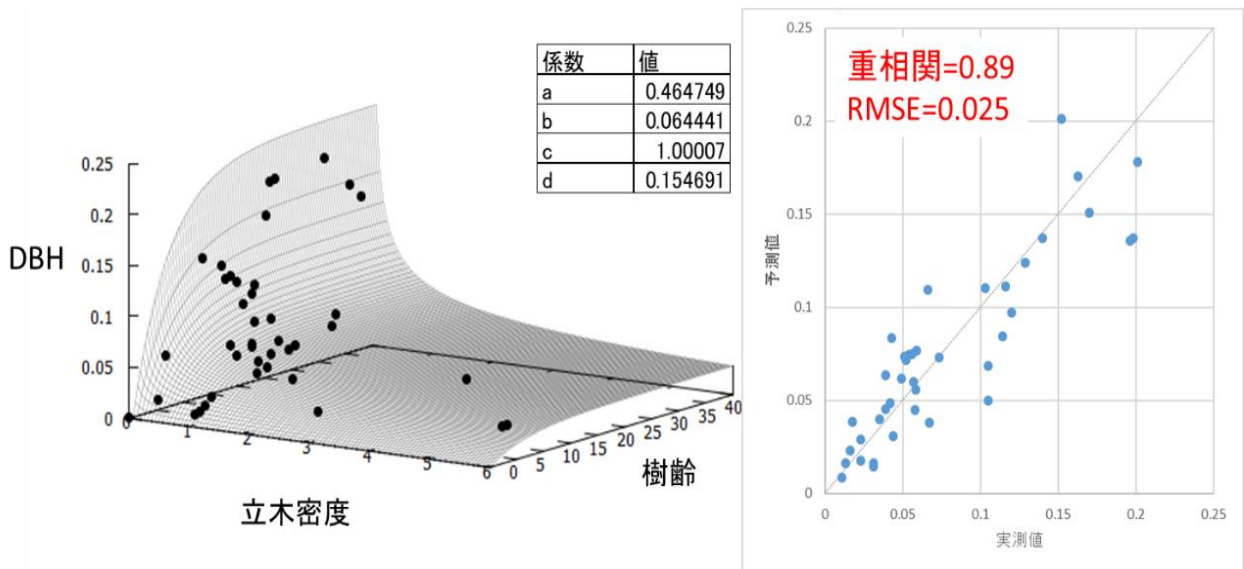


図4.4.4 (a) 樹齢に対する胸高直径 (DBH) と立木密度の関係 (b) 実測値と近似曲線による予測値の比較

(2) 森林拡大率の推定と樹種交代特性

① 森林拡大率の推定

西表島・浦内川河口に広がるマングローブ林の成長に伴う森林拡大率を算定するため、1963年から2006年に撮影された空中写真をGISで重ね合わせを行った(図4.4.5)。図中のLine1周辺では両サイドの森が先駆的に進んでいる地点のため、間を埋めるように森が進んでおり、相対的に森林拡大範囲が大きかった。Line2周辺では、比較的均一に森が拡大率していた。一方、Line3の地点では森林拡大率がほかの地点に比べて小さい結果となっていた。Line3は河道に近いので河川や潮汐の流れが速く、その影響を受けているものと考えられる。各ラインの森林の拡大率をグラフにプロットした結果を図4.4.6に示す。この図によると、Line1上で2.1m/year、Line2上で1.9m/year、Line3上で1.7m/yearであり、おおむね年間2m程度の速度で拡大している。浦内川の事例で考えるとマングローブは森を1年で2m程度広げることが可能であることが分かった。ただし、周りの環境や森の状態、場所によって森の進む速度が異なる。森林拡大率が高い条件としては、両サイドの森が先行して進むような地点で、その間を埋めるように成長することができる。また先駆的に数本のマングローブが先行して存在しているところも拡大率が高くなる。一方で、河道近くの波の流れが速い場所では、森が波に削られるため成長が遅くなると考えられる。

以上のGISによる空中写真分析により、マングローブ林がどのような速さで拡大していくかということや、森の広げ方の特徴を把握することができた。森の拡大率が高かった地点の特徴や森の配置を知ることが効率的な植林の方法を検討する手がかりとなると考えられる。

② 森林拡大に伴う樹種交代特性

本研究ではさらに森林の拡大に伴い、森林構造がどのように変化していくかを検討するため、各年代の地点で現地調査を実施した。空中写真から1963年に形成されたと推定される森の樹種構成は、オヒルギ60%、ヤエヤマヒルギ40%であった。一方、1978年の森ではオヒルギが33%、ヤエヤマヒルギが67%、1994年の森ではオヒルギが3%、ヤエヤマヒルギが97%、2006年の森ではヤエヤマヒルギが100%となっていた。森が新しくなるにつれて主となる樹種がオヒルギからヤエヤマヒルギに変化しており、約30年でヤエヤマヒルギからオヒルギへ30%まで交代し、約45年で約60%交代することが分かった。またそれぞれの地点の立木密度は、1963年、1978年、1994年、2006年でそれぞれ、1.18、0.55、0.74、0.24本/m²であった。若い森ほど樹木と樹木の間隔が広く、実生や樹径が細いもの、樹高の低いものが多くみられた。以上の結果からマングローブは成長・森林拡大にともない、数十年という比較的短期間で森林構造を大きく変化させていることが分かった。

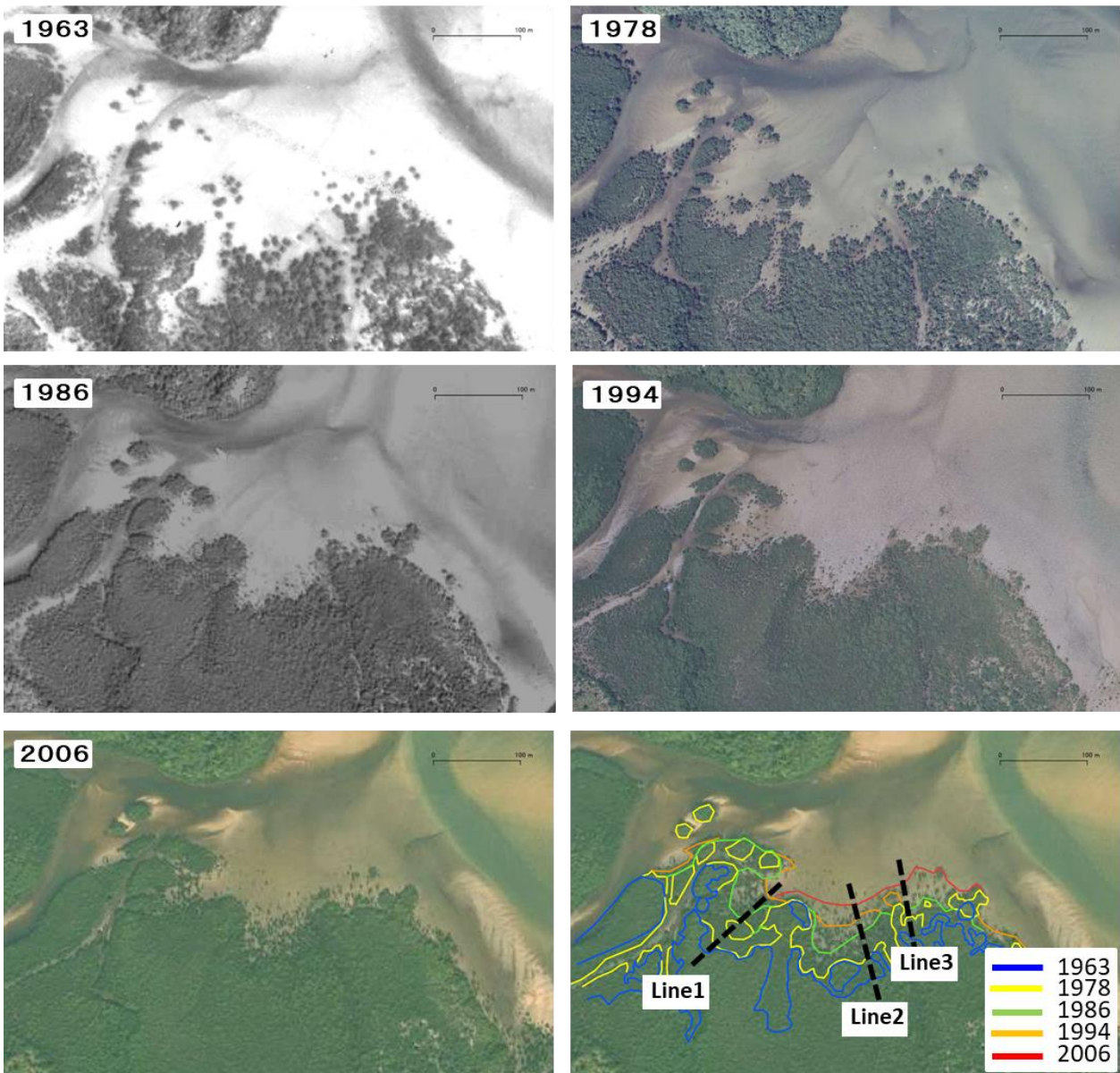


図4.4.5 1963年から2006年に撮影された空中写真をGISによって重ね合わせた結果

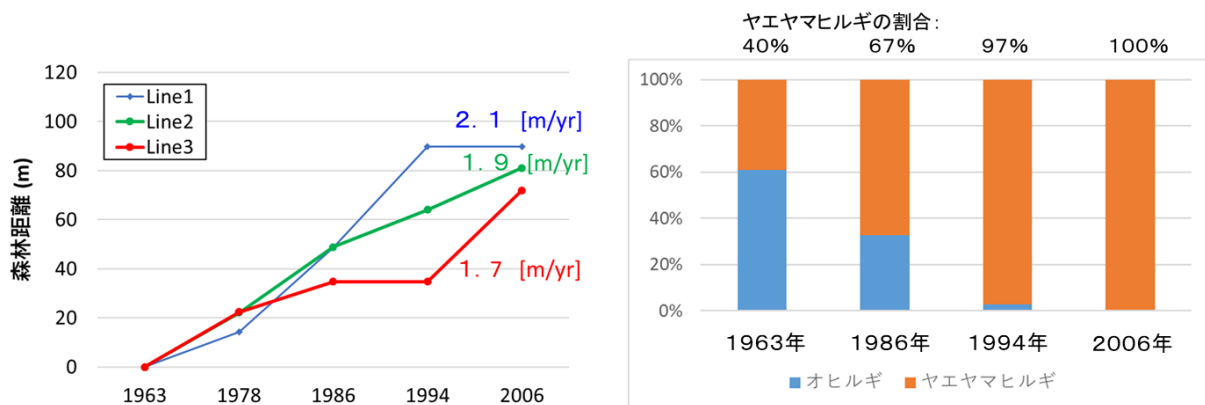


図4.4.6 浦内川マングローブ森林の拡大率(左図)と樹種交代(右図)

(3) 水理模型実験および数値シミュレーションモデルによる波浪低減特性の把握

① 水理模型実験の結果

図4.4.7に水理模型実験によって再現されたマングローブ林周辺での水位変化の一例を示す。図から、模型前面では反射波により段波の水位が急激に上昇するが、その後マングローブ林内で減衰していく様子が確認できる。図4.4.8に波高計によって測定した水位の時系列変化を示す。この結果では、マングローブ前面では模型がない場合に対し、約1.5倍程度の水位上昇がみられた。一方で、マングローブ背後では、模型がない場合よりも全体的に水位が低下している様子が確認できた。

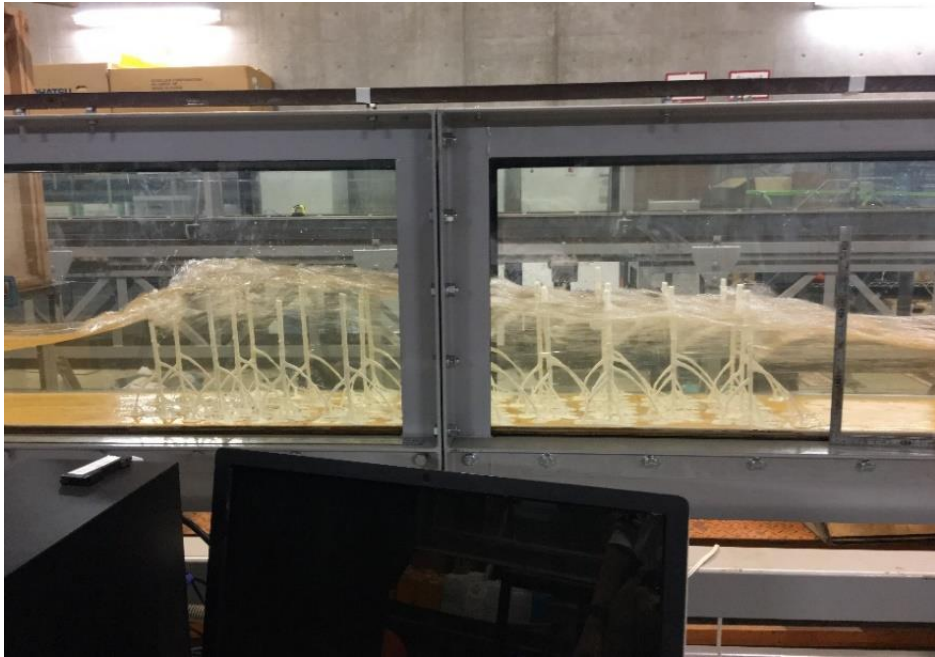


図4.4.7 マングローブ林内で段波が減衰する様子

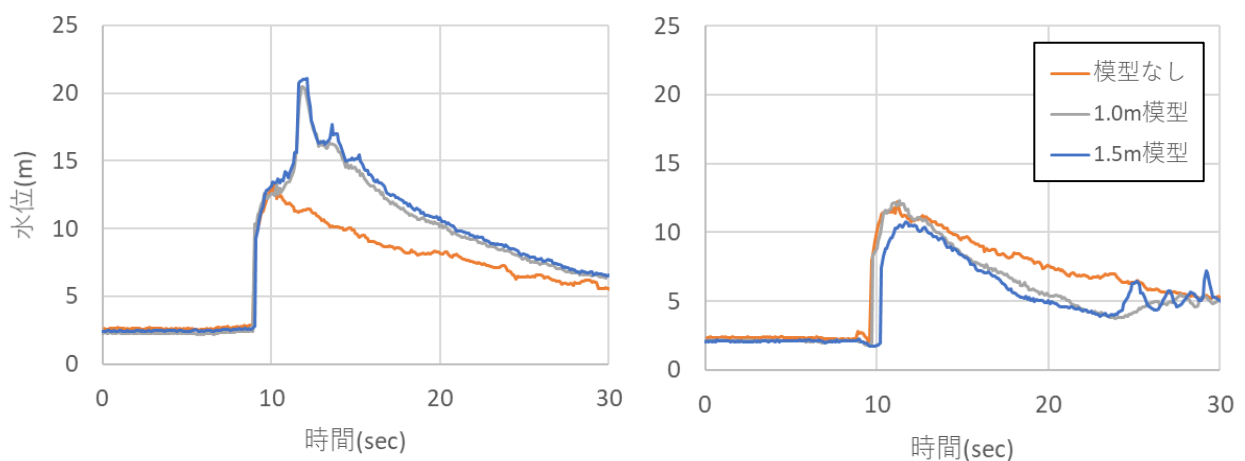


図4.4.8 マングローブ模型前後での水位変化 (左図) 模型前面-W2 (右図) 模型背後-W4

② 数値シミュレーションによる再現結果

非線形長波式とモリソン式を基礎式とした数値シミュレーションモデルを用いて、水理模型実験による水位の時間変化を再現した結果を図4.4.9に示す。数値シミュレーションモデルは水理実験による水位変化をおおむね再現することに成功している。図4.4.10には最大水位の空間変化を比較した図を示す。マングローブ模型前面部で見られた反射波については多少過小評価しているが、マングローブ背後の水位変化については精度よく再現できている。以上により、本研究で開発した数値シミュレーションモデルでマングローブ林内の波浪減衰効果を評価することが可能であることが分かった。

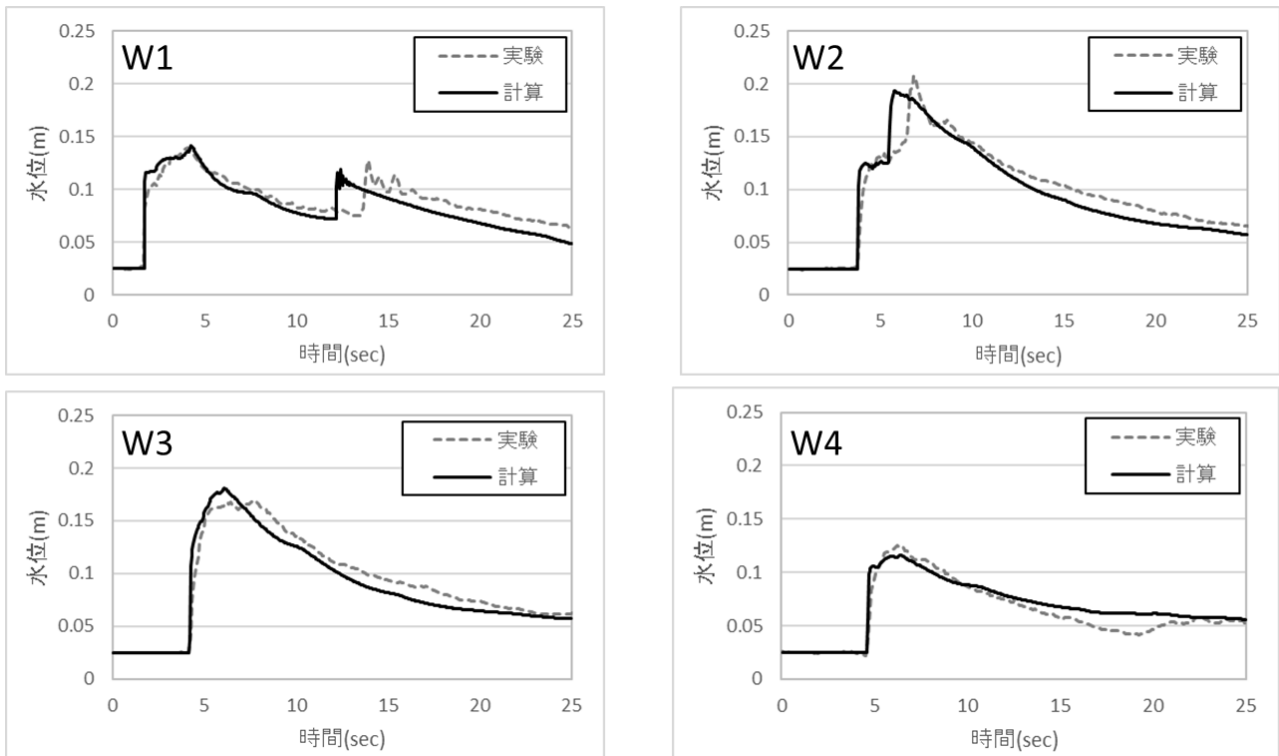


図4.4.9 水位の時系列変化に対する数値シミュレーションの再現結果

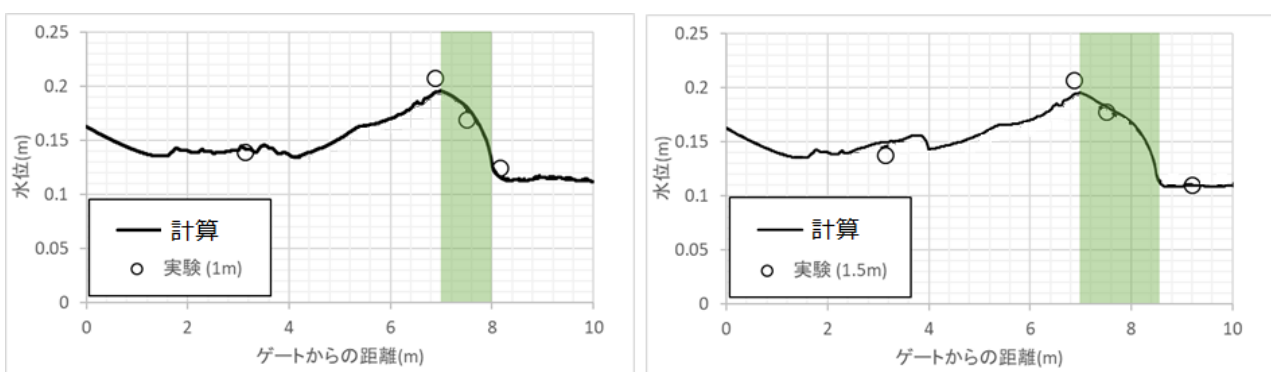


図4.4.10 最大水位に対する数値シミュレーションの再現結果
(左図) 林帯幅1.0 m (右図) 林帯幅1.5 m

(4) 成長シナリオに対する段波減衰特性の定量評価

上記(1)と(2)の成果に基づき、マングローブ植林後の成長シナリオの概念図を図4.4.11に示す。植林後のマングローブの成長に伴う形状特性の経時変化の想定に対しては、(1)の成果に基づく成長曲線や形状特性を参考にすることができる。その後、森の拡大率や樹種混合状況については(2)の成果が一つの指標となりえる。ここではシナリオの一例として、ヤエヤマヒルギを単一植林(林帯幅:100m植林(初期値)、立木密度:0.66本/m²(一定)、拡大速度:2m/年)を仮定し、15年後と80年経過後のマングローブ林の段波波浪低減効果を算定した(図4.4.12)。その結果、15年後の減衰率として、水位5%、流体力14%、80年後の減衰率として、水位12%、流体力27%という結果を得ることができた。以上により、シナリオに基づくマングローブ林の波浪低減効果を定量的に示すことが可能となった。

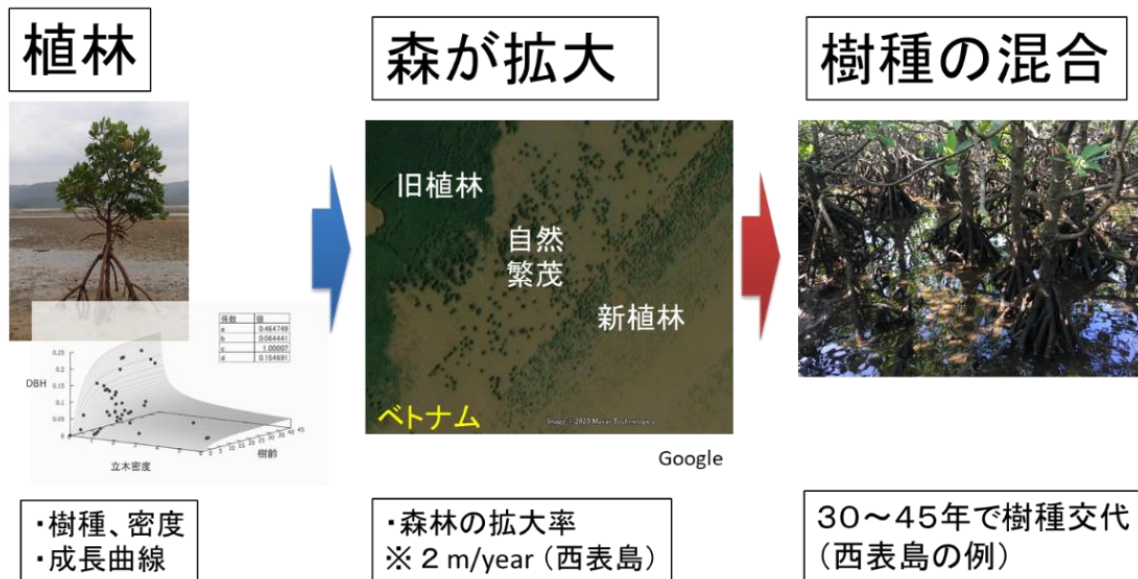


図4.4.11 マングローブ植林後の成長・拡大シナリオの概要図

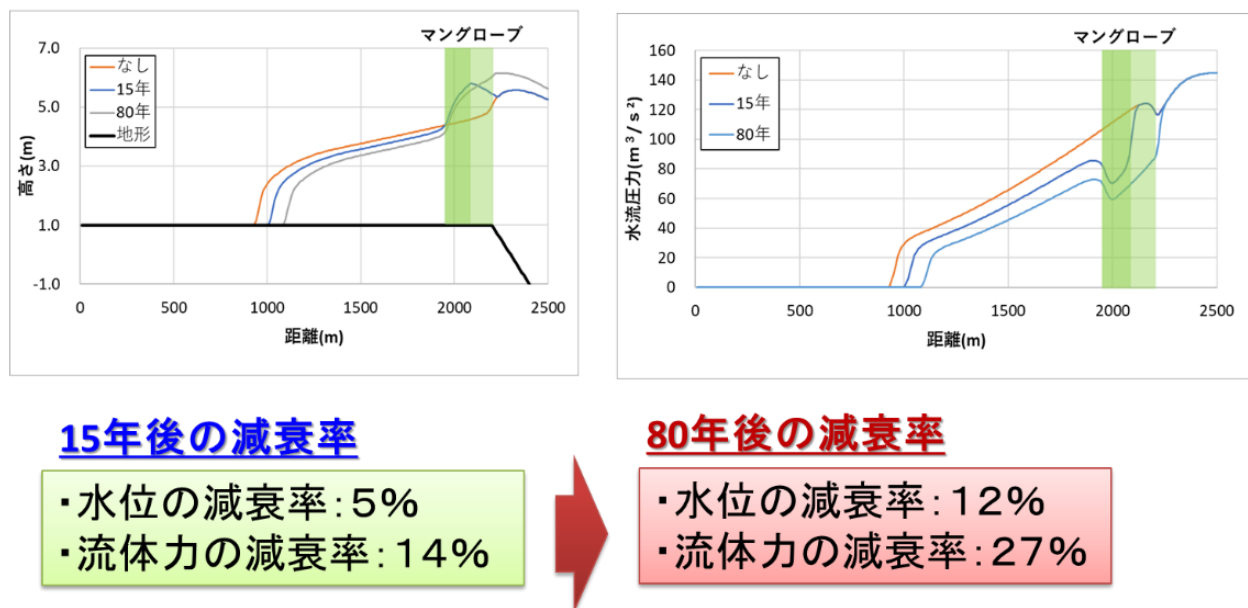


図4.4.12 マングローブ植林後の成長・拡大シナリオに対する波浪減衰効果の評価結果

5. 本研究により得られた成果

マングローブに関し、数値モデルに必要とされる樹形等の物理的特性を把握し、サブテーマ1で必要な樹形の物理的パラメタリゼーションを行った。

(1) 科学的意義

マングローブ林による減災・防災機能を社会実装していくためには、波浪低減効果を定量化していく手法を開発するとともに、マングローブの形状特性や成長に伴う経時変化のシナリオを構築しなければならない。これまで、マングローブの複雑に絡み合う根形状の把握は困難であったが、本研究で実施した3Dスキャナによる非接触型の測量技術により、複雑なマングローブの形状特性を把握することができた。またマングローブの成長に関しては、現地データが少ない中で、ベトナムなどの大学・研究機関との国際研究協力のもと詳細な現地調査を実施することで、精度の高い成長曲線を作成することができた。これにより成長に関するシナリオを構築するための基礎データを整備した。さらに空中写真判読と現地調査により、森林拡大率と樹種交代特性について分析を行い、シナリオのための基礎的な知見を得た。

波浪低減効果についての定量化においては、3Dプリンターによる高精度マングローブ模型による水理模型実験を実施するとともに、数値シミュレーションモデルを開発することで、森林成長シナリオに対するマングローブ林の波浪低減効果の定量評価を可能とした。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1960年代より、林産資源の利用やエビ池などの造成による過度の利用によって急速に森林破壊が進行し、過去50年の間に世界のマングローブ林のおよそ三分の一が失われてしまった。このようなマングローブの森林破壊の進行は、2004年インド洋大津波が襲来し、多数の犠牲者を出した地域（例えば、インドネシア・バンダアチェ）でも生じている。世界的に進む森林破壊は、マングローブ森林生態系の多様な機能を弱体化させ、生物環境の破壊、地球温暖化の促進、そして自然災害の増大を招いている。このような社会情勢の中、世界各地で国やNGO（日本赤十字社、ISMEなど）さらには民間会社によるCSR活動（企業の社会的責任）の一環としても、マングローブ植林が盛んにおこなわれるようになってきた。本研究はこのような森林・地域再生への官民の活動に対して、防災・減災効果に関する科学的知見を提供するものとなることを見込まれる。

また2011年の東日本大震災以降、Eco-DRRの観点から我が国においても海岸林（グリーンインフラ）の効果を活用した復興整備が行われている。しかしながら海岸林の整備においては、その効果を科学的かつ定量的に取り組むスキームが現場に整っておらず、必ずしも効果的な整備が行われているとはいえないのが現状である。このような中で、本研究が取り組んできた研究手法や成果はマングローブ以外の海岸林にも応用が可能な知見であり、海外地域のみならず、我が国における防災減災政策においても重要な知見となることが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

(1) 協力案件名

Environmental preservation and management of mangrove forest in Cabn Gio, HCM City, Vietnam (ベトナム・カンザーにおけるマングローブ生態系の保全と管理)

① カウンターパート氏名・所属・国名

- ・Vien Ngoc Nam (Associate Professor, Department of Forest Resources, Nong Lam University、ベトナム)
- ・Can Gio Mangrove Protection Forest Management Board, Cabn Gio, HCM City、ベトナム

② 参加・連携状況

ベトナム・カンザーにおける長期的なマングローブ生態系の保全と管理について共同調査を実施している。

③ 国際的な位置付け

上記の2機関は、ベトナム最大のマングローブ林であるカンザー地区のマングローブ生態系の保全・管理・教育を担当している。この機関は2010年に本地区が人工林として世界で初めてUNESCO MABの生物圏保全地域 (Biosphere Reserve) に指定させて創出された機関であり、その指定申請の当初から協力し、現在もこれを継続している。

(2) 協力案件名

Survey of coastal environment around mangrove plantation in Thai Binh province (タイビン省におけるマングローブ植林地周辺の海岸環境調査)

① カウンターパート氏名・所属・国名

- ・Dr. Lê Hồng Lương (Institute of Transport Science and Technology、ベトナム)
- ・MsC. Nguyễn Kim Thành (Institute of Transport Science and Technology、ベトナム)

② 参加・連携状況

ベトナム地域における海岸および、山岳地帯における災害リスクについて共同調査を実施している。

③ 国際的な位置付け

ベトナム北部タイビン省沿岸の諸集落では、マングローブ林の造成と防潮堤構築を組み合わせ沿岸整備を数百年来継続してきたが、最近27年間は国際機関やNGOの援助のもとで、*Candaria obobata*、*Sonneratia caseoralis* の計画的植林を推進してきた。この植林事業に伴って、防潮堤の補強・構築、堤防陸側低湿地の養殖池造成、マングローブ湿地の自然的な拡大が実現している。このような自然・社会状況の変化はマングローブ林と防潮堤の組み合わせがより強力に経済的にも価値のあるグリーンインフラ整備の実例として注目される。これを先駆的な事例として内外に紹介することは、本研究の先進事例に該当すると考える。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 大友萌子、宮城豊彦、浅野哲美 (2018) ベトナム、ホーチミン市一帯の感潮域における土地利用特性 —マングローブ湿地と水路網の分布に着目して—, Mangrove Science, Vol. 10, .21-34.
- 2) 内山庄一郎、宮城豊彦 (2020):70年間の画像情報による西表島仲間川のマングローブ林分布変動復元。Mangrove Science. vol. 20, pp3-15.
- 3) 宮城豊彦、馬場繁幸、内山庄一郎、柳澤英明、渡辺 信 (2020) : 沖縄県西表島におけるマングローブ樹木の成長量と成長林の関係、Mangrove Science. vol. 20, pp17-22.
- 4) 柳澤英明、宮城豊彦 (2020) : 3Dレーザースキャナーを用いたマングローブ支柱根の構造特性に関する検討、Mangrove Science. vol. 20, pp23-26.

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Miyagi, T., S. Uchiyama (2017) New Information of the Mangrove Habitat Development at the Northern Limit, Iriomote Island, Japan, Poster, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan.
- 2) 宮城豊彦、内山庄一郎、柳澤英明、馬場繁幸、渡辺 信、吉田璃奈 (2018) 今 マングローブに年輪があると判ること—パラダイムシフトがおきる—、日本地理学会秋季大会(和歌山大)講演
- 3) 宮城豊彦、内山庄一郎、馬場繁幸 (2018) 西表島のマングローブ林を調査地とした高精度4次元データによるマングローブ生態系研究の新しい試み、日本マングローブ学会 2018年大会 公開シンポジウム
- 4) 宮城豊彦、根原裕美子、馬場繁幸、渡辺信、内山庄一郎、柳澤英明、吉田璃菜(2018)沖縄県西表島におけるマングローブ樹木年輪解析の可能性と意義、日本マングローブ学会 2018年大会 公開シンポジウム
- 5) 宮城豊彦、根原裕美子、馬場繁幸、渡辺信、内山庄一郎、柳澤英明、吉田璃菜(2018)マングローブ樹木の年輪分析による森林構造形成の解明、日本マングローブ学会 2018年大会 公開シンポジウム
- 6) 内山庄一郎、宮城豊彦(2018)—沖縄県西表島仲間川での分析例—沖縄県西表島仲間川マングローブ林の70年間の立地変動に関する総括的分析、日本マングローブ学会 2018年大会 公開シンポジウム
- 7) 渡辺信・内山庄一郎・宮城豊彦(2018)森林倒壊被害から解明するマングローブ林成立のメカニズム、日本マングローブ学会 2018年大会 公開シンポジウム
- 8) 柳澤英明、宮城豊彦 (2018) 3Dレーザースキャナーを用いたマングローブ形状の測定とその展開、日本マングローブ学会 2018年大会 公開シンポジウム
- 9) 宮城豊彦、馬場繁幸、井上智美、赤路康朗、趙学群 (2019) 全休規模ダイレクトセンシングによるマングローブ林分布状況把握の可能性と意義. 第25回日本マングローブ学会大会, 東京
- 10) 柳澤英明、宮城豊彦、会田俊介(2019) 3D マングローブ模型を用いた津波減勢効果の検討, 日本地理学会秋季大会, 新潟
- 11) 吉岡征志, 大森正則, 荒川洋, 柳澤英明(2019) 津波解析コードの高速化とそれに伴う誤差に対する実務への影響評価, 土木学会年次学術講演会, 香川

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 東北学院大学一般公開講座フォーラム2018 「海岸林から考える ふるさと・里浜の復興デザイン」にて研究成果の講演・一般参加者と対話（2018年2月、参加者104名）
- 2) 宮城県緑化運動70周年記念事業公益社団法人宮城県緑化推進委員会「海岸防災林等グリーンインフラの意義と今後の展望」にて研究成果の講演（2018年）
- 3) ニッセイ財団助成研究ワークショップ「自然と歴史を活かした震災復興ー持続可能性とレジリエンスを高める景観再生ー」にて研究成果の講演（2019年）
- 4) 東北学院大学学長助成金 出版図書「津波が来た海辺 よみがえる里浜の自然と暮らし」にて研究成果の一部を紹介(2019年)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-5 グリーンインフラによる減災効果

茨城大学

理工学研究科(工学野)

地球変動適応科学研究機関

広域水圏環境科学教育研究センター

横木 裕宗

田村 誠

桑原 祐史

増永 英治

平成29(開始年度)～令和元年度研究経費(累計額)：10,826千円(研究経費は間接経費を含む)
(平成29年度：3,380千円、平成30年度：4,066千円、令和元年度：3,380千円)

[要旨]

海面上昇や高潮などの浸水影響から防護する適応策として、堤防などのグレイインフラとともにマングローブ林を用いたグリーンインフラが挙げられる。

フィリピンやベトナムにおける海面上昇等の浸水影響、グレイ・グリーンインフラの防護費用データベース構築、防護効果と費用便益を解析し、コスト評価の分析枠組みを確立した。ベトナムではマングローブ林を最大限活用することで、費用便益比が1を超えるSSPが多く、国全体で経済効率性が示された。フィリピンでは潜在的浸水域が広域に分散するため、全ての地域を防護するには費用便益比が低かった。とりわけフィリピンにおいては地域を特定した詳細なマングローブ植林計画が必要となる。

[キーワード]

海面上昇、防護、グレイインフラ、グリーンインフラ

1. はじめに

温室効果ガスを削減する「緩和策」に加え、海面上昇や高潮などの浸水影響から防護する「適応策」の必要性が唱えられている。防護方法には、堤防などのグレイインフラとともにマングローブ林を用いたグリーンインフラが挙げられる。マングローブ林は亜熱帯・熱帯地域の河口汽水域の塩性湿地に成立する森林の総称である。海と陸の境界線に沿って分布し、スマトラ沖地震の際に、津波による被害がマングローブ林によって軽減されたという事例が報告されている。このことから、資源や資金のない地域や環境保全を重視した地域では、副産物や観光利用などの観点が加わって、マングローブ林を活用した海岸防護が行われてきた。マングローブ林による防護効果には、台風に伴う高潮への防護作用や、波浪減衰・消波機能を有するため浸水影響を軽減することが知られている。

マングローブ林によるグリーンインフラの適応策は、堤防や護岸などのグレイインフラと比較して安価になることが利点となる一方、堤防等に比べて設置面積は多く必要とされる。それゆえ、人口や資本ストックの集積する都市域とそれらが疎となる地方で両者を使い分けることが適応策の一つとなるだろう。しかし、これまで地区レベルの局所的なマングローブの効果を検討する研究はあるものの、国全体や全球規模といったより広域な影響評価や長期にわたる効果評価、費用分析はあまりなされていなかった。

2. 研究開発目的

現地・文献調査などにより、沿岸部の防災に対するグリーン・グレイインフラの最適組み合わせ・配置・経済効果を検討する。このため、フィリピン及び周辺国海岸における防災・減災事例の収集を行う。ついで、マングローブによる減災効果について、物理的特性と初期投資・維持費用についてのモデルの高度化を進める。さらに、マングローブによる減災効果について、フィリピンを対象に、減災効果と費用についてのシミュレーションを行う。温暖化効果の有無による適応策の違いについても検討する。

3. 研究開発方法

図4.5.1に研究手法と防護シナリオを示す。海面上昇と潮汐による浸水計算は、海面水位変化と潮汐(TPX07.2)の空間分布を考慮し、地形はETOPO1のデータを用いた。ETOPO1は2.5分グリッドデータに重み付け平均化して、モデル上の陸域と海域の判定に用いた。地球規模の標高データは通常1m間隔であるため、ETOPO1から陸域の標高と水深分布が連続するように10cm単位で標高の平滑化処理を行った。海面水位変化は第5次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)に提供されている地球システム統合モデルのうち、MIROC-ESMの出力結果を利用した。MIROC-ESMはCMIP5に提供されているモデルの中でも平均海面水位が高めに出ることが確認されている(Tamura et al., 2019)。

防護シナリオはCase1に堤防のみ、Case2に堤防とマングローブ林を組み合わせた場合を想定する。

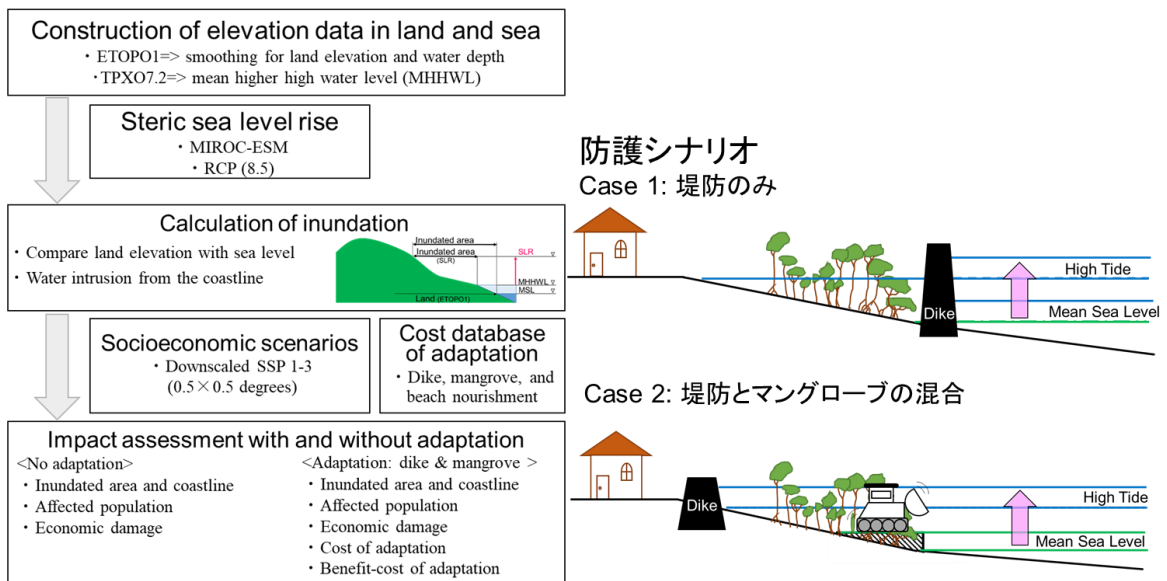


図4.5.1 研究手法および防護シナリオ

4. 結果及び考察

現地・文献調査などにより、沿岸部の防災に対するグリーン・グレーインフラの最適組み合わせ・配置・経済効果を検討した。このため、フィリピン及び周辺国海岸における防災・減災事例の収集を行った。ついで、マングローブによる減災効果について、物理的特性と初期投資・維持費用に注目してついでモデルの高度化を進めた。さらに、マングローブによる減災効果について、フィリピンを対象に、減災効果と費用に関するついでシミュレーションを行った。温暖化効果の有無による適応策の違いについてSSPをもとに検討した。計画通りの成果を得た。

(5)-1 海面上昇と潮汐による浸水影響評価

図4.5.2は、MIROC-ESMによる2100年の各RCP/SSPにおける主な国の潜在的浸水域と国土の浸水率である。潜在的浸水域とは護岸などの海岸・港湾構造物を考慮せずに海水面の変化と標高を比較して算出したものであり、「もし構造物がなければ」浸水する領域を示している。ここでは影響の大きな国を挙げている。上位10カ国で全球の約75%の潜在的浸水面積を占める。2100年のRCP8.5において、潜在的浸水域が最も大きくなるのは中国で約6万km²であり、以下、カナダ、ベトナム、アメリカ、オーストラリアの順となり、フィリピンは12番目に相当する。国土面積全体に対して潜在的浸水域が占める割合を示す国土の浸水率が最も大きいのはバハマでRCP8.5の場合に約25%、次いでベトナムの約12%であった。

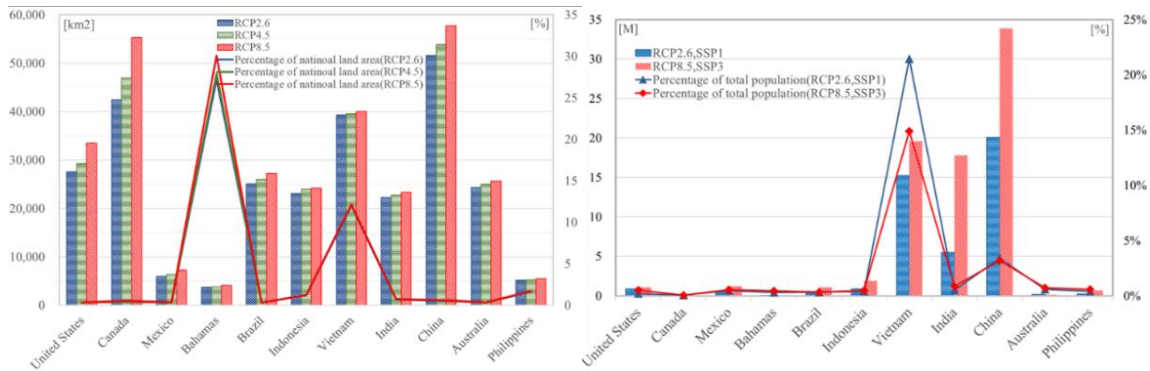


図4.5.2 主な国の海面上昇および潮汐による潜在的浸水域 (四栗他, 2017より加筆修正)

図4.5.3に、フィリピン、ベトナムの地形と現在のマングローブ分布を示す。マングローブ分布はTroCEP(Tropical Coastal Ecosystems Portal)のデータを用いた。CIA Factbook(2015)によればフィリピンは7,100を超える島、36,000km以上の海岸線を有し、メコンデルタのように広大な低平地がある地域に比べて比較的小さな潜在的浸水域が点在する。こうした地形条件は、後述する浸水被害や適応費用を左右する。

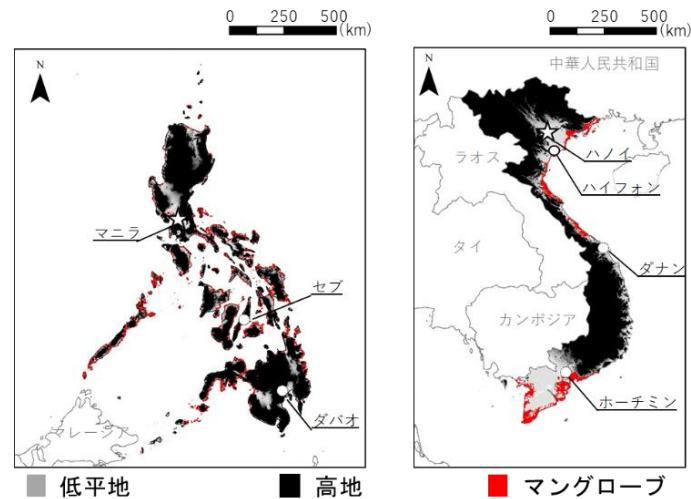


図 4.5.3 フィリピンおよびベトナムの地形とマングローブ分布

海面上昇等に伴う浸水の被害額を算定には、Tamura et al. (2019)と同様に過去の浸水被害とその国の経済状況の相関関係を用いた。影響人口と浸水域の経済状況は、Murakami and Yamagata(2016)による0.5度グリッド、10年毎の社会経済シナリオ(SSP1-3)の人口分布、GDP分布を利用し、浸水域と重ね合わせて算出した。浸水計算は2.5分グリッドのため、人口は0.5度内の144グリッド(12*12)で一様に分布し、浸水域に存在する人口を全て影響人口と仮定した。浸水域の一人当たりGDPはGDPをグリッド内の人口で除して、それぞれの値を代入して被害額を推定した。なお、ここでは避難に伴う人の移動は考慮されていない。

図4.5.4は、フィリピンとベトナムのRCP8.5における各SSPの潜在的浸水面積および影響人口を示している。2100年における潜在的浸水面積はベトナムがフィリピンの約8倍になっている。影響人口はSSP3が最大、SSP1が最小となる。これは、ベトナムは潜在的浸水面積が広く、その中に人口の多いホーチミン、ハイフォン等を含むため、影響人口が大きくなったためである。

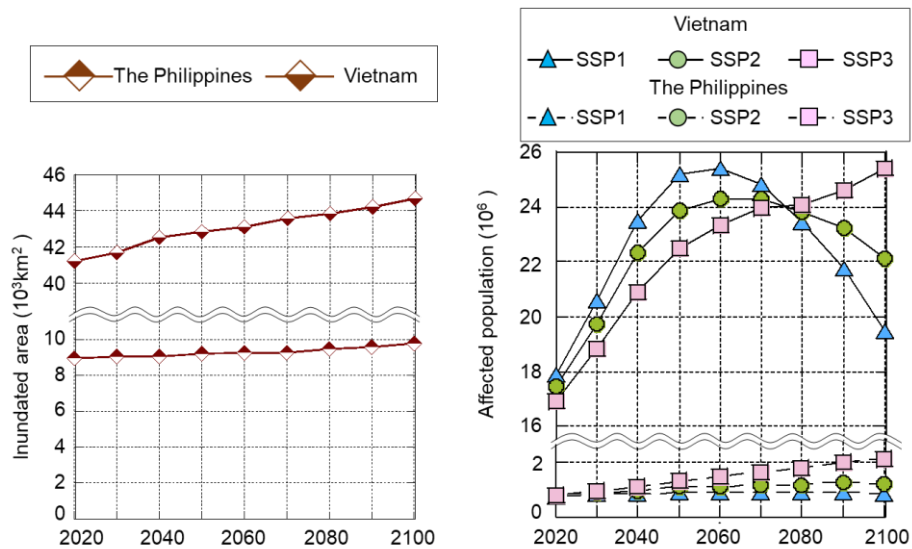


図4.5.4 フィリピンおよびベトナムの潜在的浸水面積および影響人口

(5)-2 グレー・グリーンインフラ費用データベースの構築

図4.5.5の通り、世界各国のグレー・グリーンインフラに掛かる費用データベースを構築した。堤防、護岸はアメリカ合衆国ではアメリカ軍・各州の報告書、日本では港湾空港技術研究所、ヨーロッパ各国ではEU報告書、新興国においてはJICA報告書などから費用データを収集した。堤防費用(1kmあたりの建設費用)は、20カ国455個から各国の施工終了年次の一人当たり実質GDPと比較し、推計式を求めた。同一国内でも立地や建設形式によって多様であるが、総じて国の経済水準が高くなると防護基準も上がり、防護費用も高くなる傾向にある。同様に、20カ国134個の養浜、14カ国89個のマングローブの植林・維持費用をデータベース化し、適応費用の推計式を導出した。

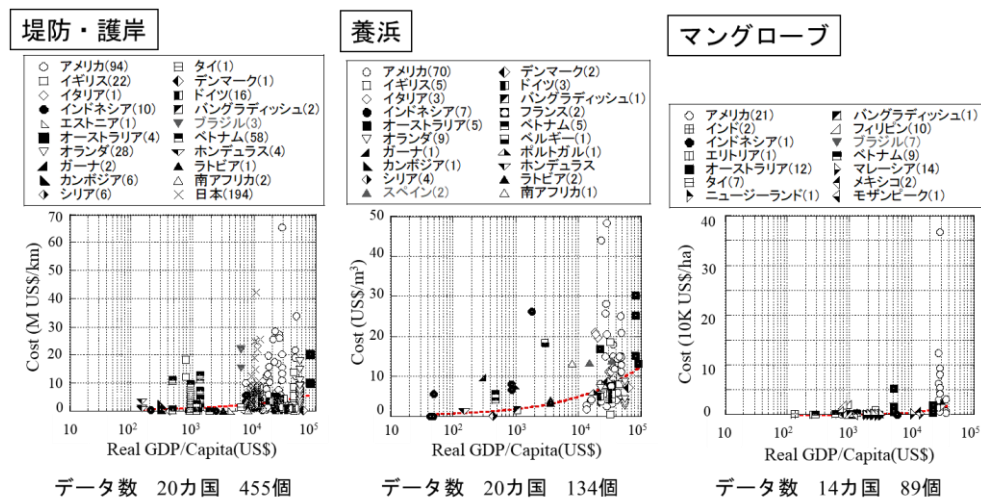


図4.5.5 世界各国のグレー・グリーンインフラ費用

(5)-3 適応効果と費用便益分析

21世紀末までの堤防とマングローブによる防護の費用効果を分析した。図4.5.6は、フィリピンおよびベトナムの適応費用を示している。Case1は堤防のみ、Case2は堤防とマングローブ林を組み合わせた場合である。堤防のみのCase1よりも、堤防とマングローブを組み合わせたCase2の方が適応費用は安価になった。

ベトナムではマングローブ林を最大限活用することで、表4.5.1に示すように費用便益比が1を超えるSSPが多く、国全体での経済効率性が示された。フィリピンでは潜在的浸水域が広域に分散するため、全ての地域を防護するには費用便益比が低かった。フィリピンにおいては地域を特定し、優先順位を付けた上での詳細なマングローブ植林と防護の計画が必要となる。

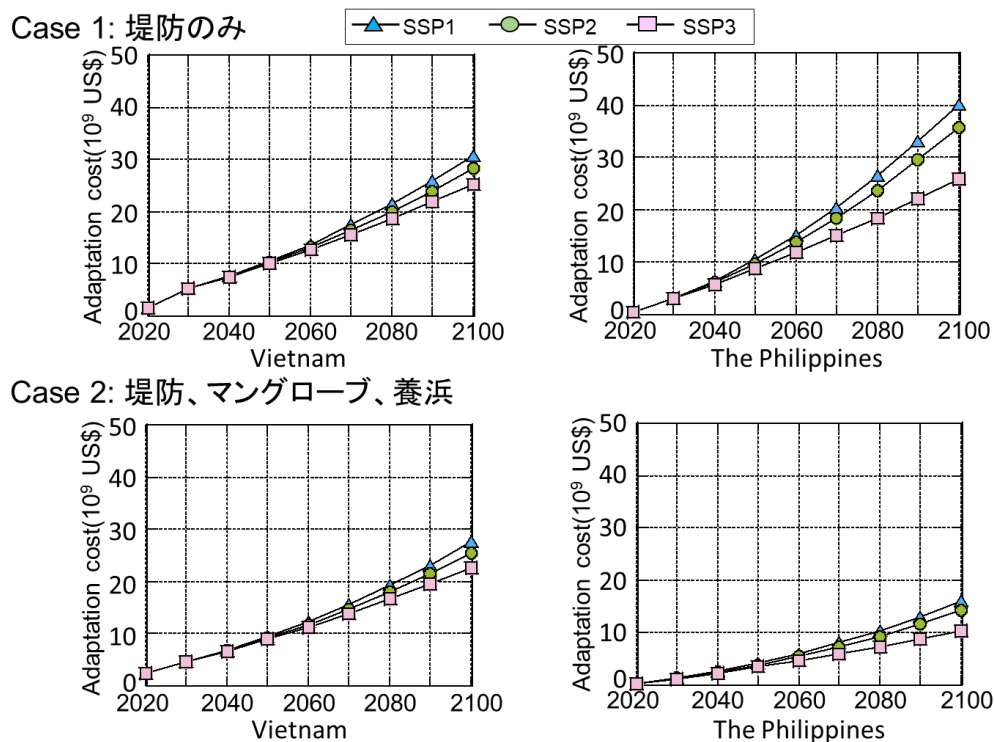


図4.5.6 フィリピンおよびベトナムの適応費用

表4.5.1 フィリピンおよびベトナムの費用便益比

<i>Vietnam</i>				<i>The Philippines</i>			
	SSP1	SSP2	SSP3		SSP1	SSP2	SSP3
Case 1				Case 1			
2050	1.08	0.73	0.98	2050	0.18	0.24	0.12
2100	1.25	1.06	0.49	2100	0.21	0.19	0.11
Case 2				Case 2			
2050	1.21	0.82	1.10	2050	0.46	0.60	0.34
2100	1.39	1.19	0.55	2100	0.52	0.47	0.29

5. 本研究により得られた成果

本サブテーマでは、グリーンインフラによる減災価値をモデル化した。さらに、グリーン・グレイインフラを併用した場合の適応コストの評価を行った。

(1) 科学的意義

フィリピンやベトナムにおける海面上昇等の浸水影響、グレイ・グリーンインフラの防護費用データベース構築、防護効果と費用便益を解析し、コスト評価の分析枠組みを確立した。ベトナムではマングローブ林を最大限活用することで、費用便益比が1を超えるSSPが多く、国全体で経済効率性が示された。フィリピンでは潜在的浸水域が広域に分散するため、全ての地域を防護するには費

用便益比が低かった。とりわけフィリピンにおいては地域を特定した詳細なマングローブ植林計画が必要となる。沿岸域における気候変動の影響に関する経済損失評価は既に幾つかの先行研究があるものの、適応策の経済評価はまだまだ少なく、グリーンインフラの費用効果を解析した事例は貴重であろう。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

海面上昇と適応費用を分析したIPCC(2019)SROCC報告書第4章にTamura et al. (2019)が複数引用され、今後のIPCC報告書等にも貢献可能な知見が得られた。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) 協力案件名：フィリピン・ケソン市にて、Small island resilience project national consultation workshopに参加し、フィリピンの研究者、行政、NGO関係者らとグレー・グリーンインフラに関する研究と社会実装について意見交換を行った(2019年3月)。
カウンターパート：Conservation International Philippines Foundation、フィリピン Development Management Office DENR - Climate Change Service、各自治体
- 2) 協力案件名：ベトナム・ソクチャン省の沿岸域における気候変動影響と適応策について現地調査を行った(2018年6月、2020年1月)。
カウンターパート：ホーチミン水資源大学、独越大学(ベトナム)

7. 研究成果の発表状況

<論文(査読あり)>

- 1) 熊野直子・田村誠・横木裕宗：土木学会論文集G(環境), 75(5), I_339-I_350 (2019)
「海面上昇に対するグリーンインフラによる適応効果と費用の検討」
- 2) Tamura, M., M. Yotsukuri, N. Kumano, H. Yokoki, *Climatic Change*, 152(3-4), 363-377 (2019)
“Global assessment of the effectiveness of adaptation in coastal areas based on RCP/SSP scenarios”
- 3) 熊野直子・田村誠・井上智美・横木裕宗：土木学会論文集G(環境), 74(5), I_395-I_404 (2018)
「フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果」
- 4) Tamura, M., K. Yasuhara, K. Ajima, V. C. Trinh, S. V. Pham, *International Journal of Global Warming*, 16(1), 102-117 (2018)
“Vulnerability to climate change and residents’ adaptations in coastal areas of Soc Trang province, Vietnam”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) Yokoki, H., M. Tamura, M. Yotsukuri, N. Kumano, Y. Kuwahara, *CLIVAR Exchanges*, 74, pp. 36-39, (2018)
“Global distribution of projected sea level changes using multiple climate models and economic assessment of sea level rise”

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Tamura, M., N. Kumano, H. Yokoki, *International Workshop: Natural Resources, Human Resources, and Risk Management in the Context of Climate Change*, Hanoi University of

- Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam, January 10, 2020. (Outstanding poster presentation award)
- “Assessment of the effectiveness of adaptation against global sea-level rise”
- 2) Kumano, N., M. Tamura, T. Inoue, H. Yokoki, 2019 AGU Fall Meeting, Moscone west, San Francisco, December 10, 2019
“Estimating the cost of coastal protection using mangrove forests against sea level rise in the Philippines and Vietnam”
 - 3) 熊野直子・田村誠・横木裕宗, 第27回地球環境シンポジウム, 富山国際会議場, 2019/8/29
「海面上昇に対するグリーンインフラによる適応効果と費用の検討」
 - 4) Tamura, M., 4th National Institute for Environmental Studies (NIES) Forum, Hanoi, Vietnam, January 23, 2019
“Coastal adaptation mixing gray and green infrastructures to climate change in Vietnam”
 - 5) Tamura, M., N. Kumano, T. Inoue, H. Yokoki, Hanoi Forum 2018, Hanoi, Vietnam, November 10, 2018
“Impact and cost assessment of coastal protection mixing green infrastructure against sea level rise in Vietnam”
 - 6) 熊野直子・田村誠・井上智美・横木裕宗, 第26回地球環境シンポジウム, 長崎大学, 2018/9/7
「フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果」
 - 7) Tamura, M., N. Kumano, M. Yotsukuri, Y. Kuwahara, H. Yokoki, 2017 AGU Fall Meeting, Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, December 12, 2017
“Global cost analysis on adaptation to sea level rise based on RCP/SSP scenarios”
 - 8) Yokoki, H., Tamura, M., Kuwahara, Y., International WCRP/IOC Conference 2017 “Regional Sea Level Changes and Coastal Impacts”, Columbia University, USA, July 12, 2017
“Global distribution of projected sea level changes using multiple climate models and economic assessment of sea level rise”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム、ひらめき・ときめきサイエンス（高校生対象）「温暖化する地球環境に私たちはどう適応できるのか？サステナビリティ学への招待」にて成果紹介、（2017年8月10日、参加者38名）
- 2) 茨城大学一般公開講座、サステナビリティ・フォーラム2017「コミュニティ主導型適応策」にて成果紹介（2017年11月7日、参加者16名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞（2018年7月25日、全国版、16頁、「台風減災 マングローブで挑む 京大など、波弱める効果を検証」）
- 2) 毎日新聞（2019年1月21日「+2℃の世界：温暖化に伴う海面上昇被害、世界で52兆円以上 茨城大など調査」）

(6) その他

- 1) Tamura, M., N. Kumano, H. Yokoki (2020) 界で52兆円以上 茨城大など調査」7年11月7日、参加者16名)にて成果紹介、(2017年8月10日、参加者38名)essment of sea level

rise” olumbia University, USA, July 12, 2017of Resources, and Risk Management in the context of Climate Change, Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam, January 10, 2020. **(Outstanding poster presentation award)**

8. 引用文献

- 1) 四栗瑞樹・田村誠・熊野直子・増永英治・横木裕宗(2017)「RCP・SSPシナリオに基づく全球沿岸域での海面上昇による浸水影響評価」『土木学会論文集G(環境)』, 73(5), pp.I_369-I_376.
- 2) Amante C, Eakins BW (2009) ETOPO1: 1 Arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19p.
- 3) Egbert GD, Erofeeva SY (2002) Efficient inverse modeling of Barotropic ocean tides. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 19(2): 183-204.
- 4) Murakami D, Yamagata Y (2016) Estimation of gridded population and GDP scenarios with spatially explicit statistical downscaling, ArXiv, 1610.09041.

II-6 ライフサイクルを考慮した最適な組合せに関する研究

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
 海洋研究領域 耐波研究グループ グループ長 鈴木 高二朗
 海洋研究領域 耐波研究グループ 主任研究官 鶴田 修己

<研究協力者>

琉球大学熱帯生物圏研究センター、国際マングローブ生態系協会
 馬場繁幸

平成29(開始年度)～令和元年度研究経費(累計額)：18,659千円(研究経費は間接経費を含む)
 (平成29年度：7,280千円、平成30年度：6,821千円、令和元年度：4,558千円)

[要旨]

本サブテーマでは、ライフサイクルコストを考慮したグリーンインフラとグレーインフラの最適な組み合わせを導くための基本的なフレームワークを構築した。始めに、ライフサイクルコストを算出するために必要な入力データ(境界条件)を整理し、その詳細データの取得を目的に、グリーンインフラを対象とした水理実験を実施して、グリーンインフラによる波の減衰効果について検討した。さらに、グリーンインフラの最適な配置を検討するためのフレームワークを構築し、コスト試算から、グレーインフラとの組み合わせによるライフサイクルコストの変動傾向について検討した。

水理模型実験では、まず、サブテーマ4で得られた3Dスキャナによるマングローブ実樹木の形状データを用い、3Dプリンターから忠実な形状を再現した3次元模型を複数個作成し、試験体として林帯が波に及ぼす影響すなわち波高減衰効果を検討した。さらに、西表島から採取した実樹木を大規模水路に設置し、マングローブに作用する波力を検討するとともに、樹木の破壊形態について調査した。既往研究を見ると、これまでの水理実験では複雑な形状を有するマングローブに対して単純な円柱群模型や簡易的なモデル化が施された3次元模型が用いられることが主で、再現性に関して議論の余地を残していた。本研究での3Dスキャナ及び3Dプリンターによる忠実な3次元模型を用いた水理模型実験と、更には実樹木を用いたマングローブの大規模水理実験はともに世界初の試みであり、これまでとは全く異なり、現実を忠実に再現したマングローブから精度高い耐波性能に関するデータを取得することができた。これらデータは、サブテーマ1の数値シミュレーションモデルの構築に活用され、また本サブテーマにおいては、ライフサイクルコストを算出するための基礎的な入力条件の算定法としてフレームワークの一部にフィードバックする形で組み込んだ。ライフサイクルコストの算定では、背後市街地の防護施設として越波流量に基づきグレーインフラの必要高さを算定し、波高減衰量を定量化したグリーンインフラの林帯幅・植生密度とそれによるグレーインフラの高さ節減量に関して最適な組み合わせを導き、さらにグリーンインフラの自然拡幅やグレーインフラの更新費用に関する検討方法についても枠組みを提案した。

[キーワード]

グリーンインフラ、グレーインフラ、ライフサイクルコスト、波力、越波流量

1. はじめに

高潮や高波に対する背後地の防護機能を目的とした港湾施設の設計では、国内の設計基準においては防波堤や防潮堤などのグレーインフラの建設が前提とされている。一方で、マングローブや松林などのいわゆるグリーンインフラによる高波や津波に対する防護機能については、樹木形状や植生密度・林帯幅などの植生条件が現地によって多岐に渡るため、定量的なデータの蓄積は未だ十分とは言えず、グリーンインフラを防護施設の一部として明確に設計へ織り込むには至っていない。ただし、実際の高波や津波被害において樹木群が波の低減効果に一定の範囲内で寄与していたと推定される調査報告は少なくない。例えば、東北地方太平洋沖地震津波では、青森県三沢市海岸林において津波による倒木範囲が林帯途中までに留まったことが報告されており¹⁾、海岸から倒木限界までの範囲において津波による波力が相当程度減殺されていたことが推察できる。また、同津波災害において八戸市市川町では、市川海岸林が複数の漂流船舶等を補足し、漂流物の内陸側市街地への侵入を防いだ事例が報告されている^{2), 3)}。高潮・高波被害に対しても、林帯による減災効果の事例が挙げられ、例えば1969年の伊勢湾台風では、鈴鹿市鼓ヶ浦海岸において波浪による越堤と一部破堤が生じるなか、防潮林が跳波の勢力を減殺して内陸側の海水浴場施設・民家への重大な潮害を防いでいる²⁶⁾。このように林帯による波力の減殺効果を示す報告は度々されるが、海水の内陸への侵入を完全に阻止して浸水被害を防ぐためには、依然として防潮堤の設置が必須となる。また、ある程度以上の波が襲来した場合、波力に耐えきれず樹木が破壊されて防護機能を発揮できなくなるうえ、漂流物となって背後地の被害を増大させ得る可能性も併せて考慮すべきである²⁴⁾。こうした観点から、高波や津波から背後地を守るための手段としてグリーンインフラを活用する場合には、グレーインフラと組み合わせた多重防護システムを前提とすべきであり、グリーンインフラによる入射波の勢力低減効果を期待して堤防の必要高を削減するなど、グレーインフラに対する補助的な効果に焦点を置いて設計することが現実的と言える。

林帯の防災効果を見込み、実際に防護施設の一部としてグリーンインフラを設計に織り込むには、以下各項目の決定或いは把握が必要になると考えられる。

1. どの程度の防護を目標とするか
2. どの程度の波が襲来するか
3. どの程度のグリーンインフラが、襲来する波をどの程度抑制するか
4. 抑制しきれなかった分の波を抑えきるには、どの程度のグレーインフラが背後に必要か
5. どの程度グリーンインフラとグレーインフラを組み合わせれば安価になるか

以上の項目により第一段階の施工計画が立てられるが、第二段階では施工後における維持管理に関する長期的計画を立てるため、さらに以下の項目を考慮しつつコストを見込む必要がある。

6. 通常の維持管理費
7. 台風や津波等のイベント発生時の復旧費用

項目3～5については、グリーンインフラによる波の抑制効果についての精度良い評価手法の確立が必要となる。入射波の予測（項目2）においても、数値シミュレーションによる検討ではグリーンインフラの影響を考慮した波浪モデルを新たに導入しなければならず、ここでもやはりグリーンインフラによる波の抑制効果を定量化することが課題となる。

グリーンインフラの防災効果の定量化に関する既往研究を見ると、国内では松林に関する検討が多くを占めている^{5), 6), 7)}。しかしながら、陸地に植生する松による林帯は、波が防護施設を超えて陸側へ大きく越波するか或いは巨大津波が遡上する場合に限って防潮林として機能することができ、限られた林帯幅ではそうした異常波浪や巨大津波の減衰効果に対して限界があるため、防護施設の一部として設計に直接織り込むことは難しい。一方、東南アジアではより海辺に近接する位置に複数種のマングローブが広く植生しており、それら樹林は満潮時には海中へ一部浸水することから平時より波に対する影響力を有して、より高い防災効果が期待できる。ところがマングローブに関する既往の水理模型実験を見ると、複雑形状を有するマングローブ樹木の再現には、簡易な円柱群模型か或いは簡易なモデル化が施された模型を適用することが多く、その再現性について検討の余地が残されている^{8), 9), 10)}。

本節では、グリーンインフラに関する背景とその問題点について整理した。以下に要点をまとめる。

- ・グリーンインフラは、多重防護システムの一部として設計することが重要である
- ・設計には、グリーンインフラの防災効果を定量化する必要がある
- ・防護効果が期待できるマングローブは、特に定量化に関する検討が不十分である

2. 研究開発目的

水理模型実験により、グリーンインフラとグレーインフラが共存した場合に、各インフラ及び背後地へ作用する波や流れの影響を調べる。また、サブテーマ1と共同で実験を再現する流体数値シミュレーションを開発する。実験と数値計算をもとにグリーン・グレーインフラの最適配置を検討する。大規模水理実験によりインフラ周囲の詳細な波や流れを調べ、マングローブの耐荷重耐力を明らかにする。これと並行して、ライフサイクルコストを試算し、最適なグリーン・グレーインフラの組合せ、及び背後地に対する減災効果を明らかにする。具体的には、以下のような目的のもと研究を進める。

グリーンインフラの設計における問題点を鑑み、多重防護を前提としたグリーンインフラ及びグレーインフラの設計に関する検討を実施する。検討に当たっては、背後地を防護するために必要とされる仕様に加えて、ライフサイクルコストを考慮したグリーン/グレーインフラの最適な組み合わせを検討する。コスト算定のための具体的な入力条件として、ここでは単純化してグリーンインフラについては植生密度及び林帯幅を、グレーインフラについては堤体高さを引数とし、断面幅当たりの必要経費を算出するためのアルゴリズムの構築を狙う。先述の通り、設計においてグリーンインフラの仕様を決定するためには、入射する波に対する減衰効果について定量的なデータの収集が必要である。ここでは、海辺に植生するマングローブ林を対象に、再現性の高い樹木模型或いは実樹木を用いた水理模型実験を実施し、波の抑制効果及び樹木の耐力と破壊過程に関する検討を進める。また、波の抑制効果については、入射波高及び堤前波高を高精度に取得するためのサブテーマ1で開発する波浪モデルの開発に活用する。

その後、実際にグリーンインフラとグレーインフラの最適配置（組み合わせ）を決定するためのアルゴリズムを構築し、便宜的な設定からコストの試算を実施するとともに、最適配置の変動傾向について検討を実施する。

3. 研究開発方法

本研究では、グリーンインフラ及びグレーインフラの最適な組み合わせの検討方法の構築を目指す。ここでは、以下の2段階に検討手順を分ける。

- ・グリーンインフラによる波の抑制効果の検討（実験）
- ・グリーンインフラ及びグレーインフラの最適な組み合わせの検討（アルゴリズムの構築）

まず、以下表に示す各実験に関する詳細を述べる。

表-3.6.1 実験種別

実験種別	スケール	試験体	解析対象
中規模実験	1/7	模型 (3Dscan&print)	作用波力、波高減衰効果
大規模実験	1/1	実樹木	作用波力、樹木の撓り
大規模破壊実験	1/1	実樹木	作用波力、樹木の耐久性
要素載荷試験	1/1	実樹木	樹木の耐久性、撓り

(1) 中規模水理模型実験

マングローブは、地盤から露出する根が複雑な形状・構造を有しているが、先述の通り、既往研究における水理模型実験では、円柱による簡易的な樹木の再現が主であった。円柱による代替実験では、単体のマングローブを対象に空隙率が一致するよう円柱配列が調整されるため、現地の樹木群のように空隙率の分布が複雑化する高い立木密度への適用が難しく、検討対象が限定化される問題があった。本研究では、サブテーマ1及び4との連携から、3Dスキャナを用いた実樹木の3次元データ（ST4による）を

基に3Dプリンターを用いたマングローブの精巧な3次元模型（ST1による）を作成し、現地樹木を忠実に再現しつつ、模型単体設置及び林帯による模型群設置の各条件でマングローブ樹木に作用する波力の算定と波高減衰効果の評価を目的とする水理模型実験を実施した。3次元データと取得した対象樹木は、ベトナム・カンザー地区に植林された19年生のマングローブである。実験では、長さ105m、幅55cmの中型水路を用いて、1/7スケールの模型（高さ19.5cm）を設置した。林帯形成のための樹木模型群の設置に際しては、ST4で得られた立木密度の調査結果に基づき、配置を決定している。設置に当たっては、ST4での調査結果を参考に、胸高直径・樹齢と胸高直径・植生密度の関係から、対象とする林帯の樹齢 y [年]に対する植生密度 γ [本/m²]を以下式で算定した。

$$\gamma = \left(\frac{0.04}{d}\right)^{1/0.54} ; \quad d = a \times b^{\exp(-cy)}$$

ここに、 d : 胸直径[m]である。各係数 a 、 b 、 c は、高密度の林帯では $a=5.3$ 、 $b=0.047$ 、 $c=0.33$ が与えられる。現地マングローブ樹木は樹齢19年であるため、高密度林帯として上式に代入すると、植生密度 $\gamma=0.6$ 本/m²（1/7スケール： $\gamma=29.4$ 本/m²）が得られ、これを実験条件とした。

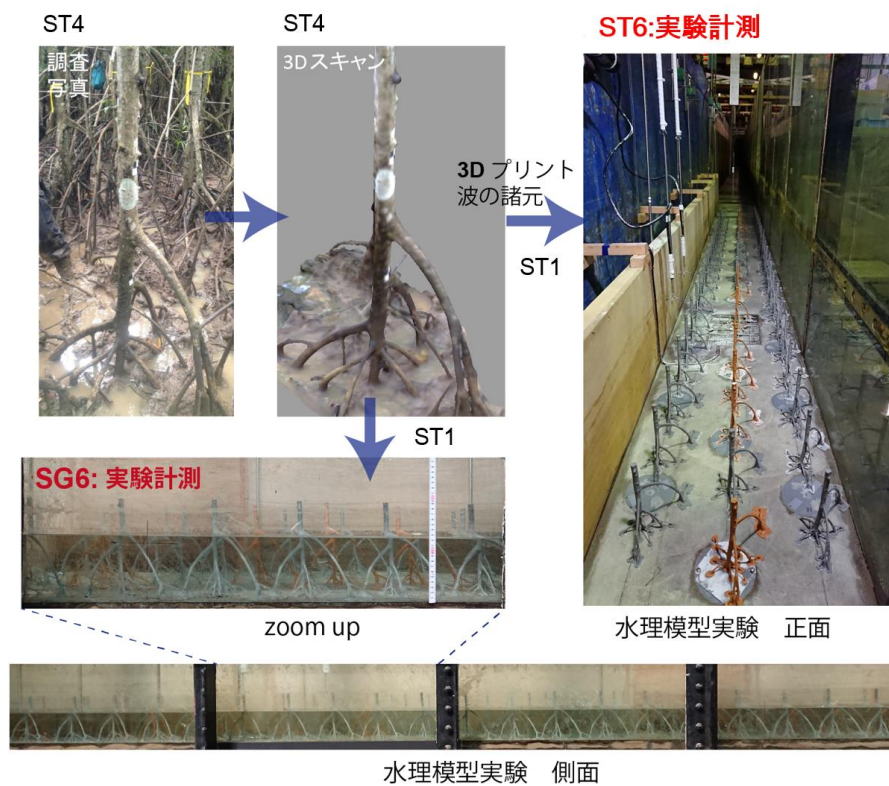


図3.6.2 中規模水理模型実験の水理模型実験の模型配置状況

模型配列は、図3.6.3のように千鳥格子状に21×3列として、設定した植生密度を満たすように、模型間に0.185mの間隔を設けた。さらに、初期水深は $h=13$ cmとし、図3.6.4に示す規則波を与えた。

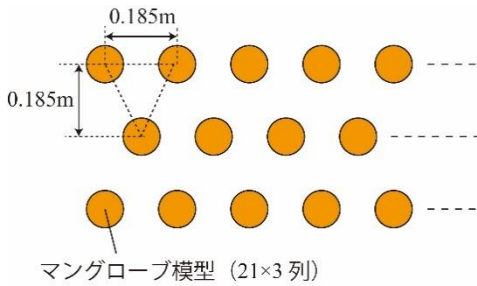


図3.6.3 中規模水理模型実験の模型配列

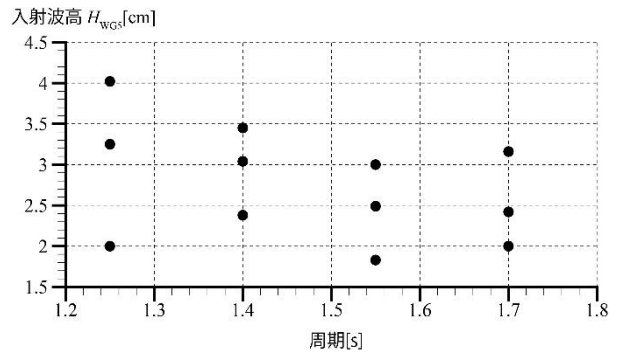
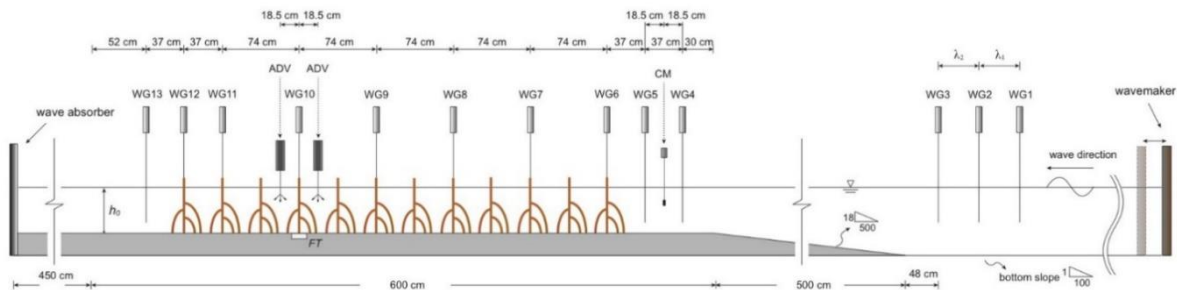


図3.6.4 中規模水理模型実験の水理条件

実験にあたっては、三分力計および超音波式流速計を用いて対象樹木の作用波力・周囲流速を計測し、さらに複数箇所に波高計を設置して、水深・波長・波高・立木密度の違いによるグリーンインフラの波高減衰効果を追跡した。計測機及び模型の設置状況を以下の図に示す。



WG:波高計、ADV:流速計(3軸方向)、CM:流速計(1軸方向)

図3.6.5 中規模水理模型実験の実験条件概要

(2) 大規模水理実験及び破壊実験

本研究では、各サブテーマと連携し、琉球大学熱帯生物圏研究センターの協力から西表島に植林されたマングローブ(ヤエヤマヒルギ)を採取し、幅3.5m、高さ12m、長さ184mの大型水路に設置して、マングローブに作用する波力・波圧の計測を行うとともに、津波の孤立波による実樹木の破壊過程とその際の作用波力・波圧について調査した。以下図に、実験における試験体及び計測機器の設置概要を示す。なお、実験計測には分力計、波高計、波圧計、流速計を用い、試験体は水路に埋め込まれた分力計架台の上に設置して実験を行った。

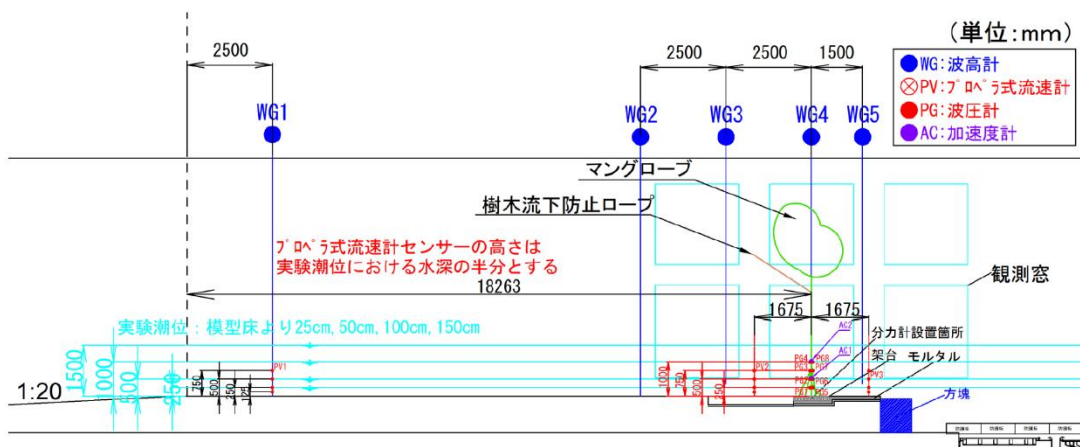


図3.6.6 大規模水理実験の試験体及び計測機器の設置概要



図3.6.7 大規模水理実験の試験体設置状況及び水理実験のスナップショット



図3.6.8 試験体写真（西表島）

(3) 樹木の載荷破断試験

樹木の破壊基準を検証するため、西表島で採取したマングローブ（ヤエヤマヒルギ）実樹木を対象に、載荷試験を行い破断までの曲げ応力及びヤング係数を調査した。実験では、幹の中央部および先端部と分けて、下図に示すように、支点間中央から荷重をかけ、レーザー変位計を用いて樹木の変形を計測した。荷重は5kgの重りから始めて、塑性変形後、完全に樹木が破断するまで徐々に重量を追加した。

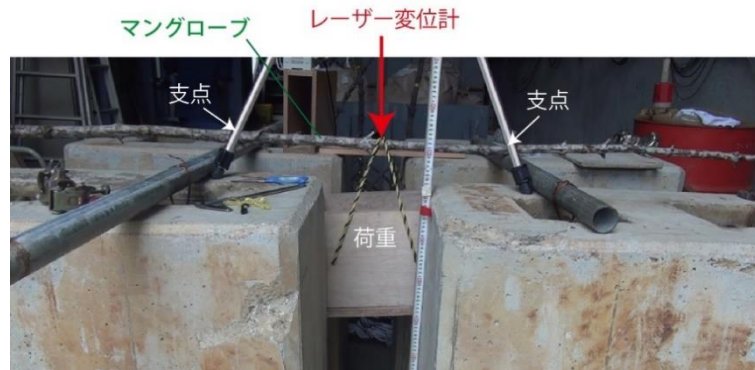


図3.6.9 荷重破断試験の実験設定

(4) グリーンインフラ及びグレーインフラの最適な組み合わせの検討（アルゴリズムの構築）

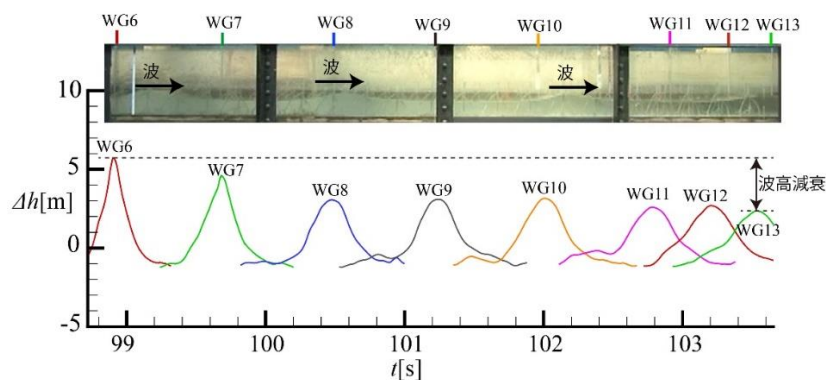
グリーンインフラ及びグレーインフラを配置するうえで、最適な組み合わせを検討すべく、アルゴリズムを構築する。一般に国内で用いられる設計の技術基準を参考に、越波流量を基としたグレーインフラの必要高さを決定する。その際に、先の水理模型実験で明らかにしたグリーンインフラによる波高減衰効果を導入して、任意の林帯幅・植生密度に対するグレーインフラの必要高さの変動を見る。さらに、各々のインフラに掛かるコストを試算し、単価変動によるグリーンインフラの植生戦略（最適な林帯幅や植生密度の決定）について検討する。

4. 結果及び考察

中規模水理模型実験により、グリーンインフラとグレーインフラが共存した場合に、各インフラ及び背後地へ作用する波や流れの影響を調べた。さらに、大規模水理実験によりインフラ周囲の詳細な波や流れを調べ、マングローブの耐荷重耐力を明らかにした。また、サブテーマ1と共同で実験を再現する流体数値シミュレーションを開発した。これと並行して、実験と数値計算をもとにグリーン・グレーインフラの最適配置を検討した。ライフサイクルコストを試算し、最適なグリーン・グレーインフラの組合せ、及び背後地に対する減災効果を明らかにした。計画通りの成果を得た。

(1) 中規模水理模型実験

図4.6.1に、規則波を用いた代表的な実験ケース ($h=10.0\text{cm}$, $T=2.5\text{s}$) のスナップショットと各波高計が取得した波高の時系列を示す。なお、簡単のため、グラフでは特定の波を抽出し、その前後の水位変動値は省略している。各波高系が示した波高計測値から、グリーンインフラによる波高減衰効果が示されている。

図4.6.1 規則波実験における波高減衰 ($h=10.0\text{cm}$, $T=2.5\text{s}$, $H=7.5\text{cm}$)

こうした波高減衰の効果を数値シミュレーションモデルへ反映するにあたり、より汎用性を持たせるため、流速 u と関連付けられたグリーンインフラによる抗力 F を、以下式で示される抗力モデル

$$F = \frac{\rho}{2} C_D \int_{-h_0}^{\eta} u|u| dA + \rho C_M \int_{-h_0}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial t} dV$$

を導入して、本実験から以下図に示す抗力係数 C_D および慣性係数 C_M を取得した（詳細はST1を参照）。

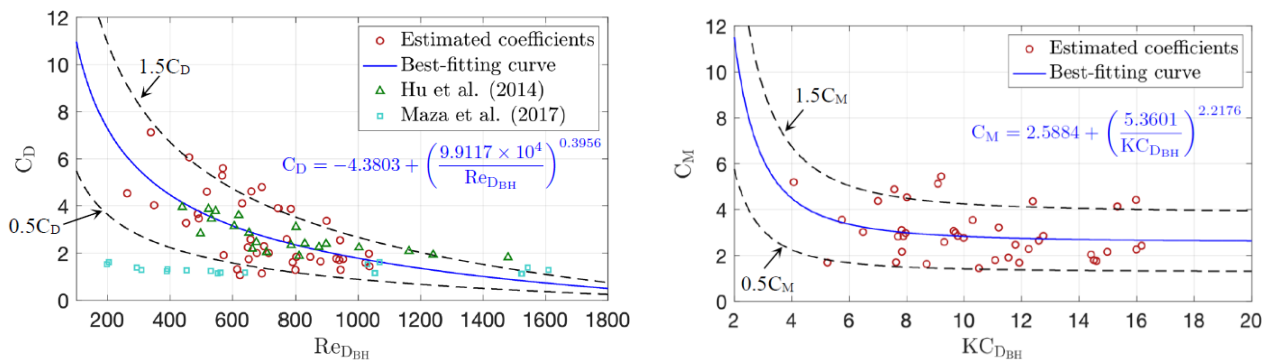


図4.6.2 中規模水理模型実験：規則波実験における抗力係数及び慣性係数

単純化された円柱模型による既往水理模型実験と比較して、各係数が水理条件によって散逸性が高くなる結果となった。ここから、既往の実験方法ではマングローブによる抗力が過少評価或いは過大評価のいずれをも取る可能性が示唆されており、本実験では実樹木の複雑性が忠実に反映された結果が得られた。

以下は、追加実施した津波に対するマングローブ林による波高減衰を示す水理模型実験の結果である。ここでは、ST4の水理模型実験（津波の段波）との切り分けから、津波の孤立波を対象に水理模型実験を実施した。本実験では、支柱根に焦点を当てて胸高程度までの高さの模型を用いたため、入射波高が比較的高い条件では波高減衰の効果が抑えているが、波面が支柱根に掛かる場合は波高減衰効果が明瞭に表れた。

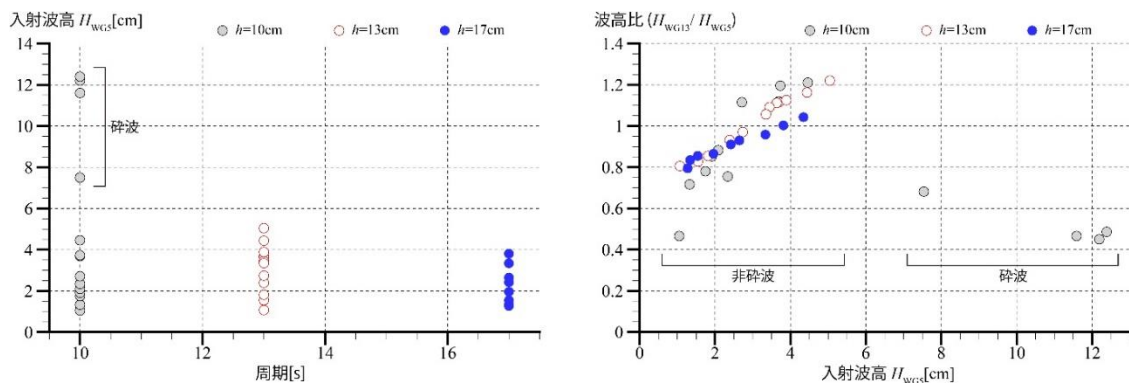


図4.6.3 中規模水理模型実験：孤立波実験（左：水理条件、右：実験結果の波高変動）

(2) 大規模水理実験及び破壊実験

以下図に、実樹木を用いた大規模水理実験での代表事例における、規則波による樹木への作用波力の時系列を示す。ここでは、先の中規模水理模型実験（1/7スケール）の実験条件に近い水理条件を示す（スケール換算で $h=17\text{cm}$ 、 $T=1.21\text{s}$ 、 $H=3.0\text{cm}$ ）。樹木に作用する岸沖方向の水平波力を抽出したところ、実樹木では、 $F=15\text{N}$ 程度の値（1/7スケール換算では $F=0.045\text{N}$ ）となり、中規模水理模型実験（ $h=17\text{cm}$ 、 $T=1.20\text{s}$ 、 $H=2.9\text{cm}$ ）と同程度の波力であった。

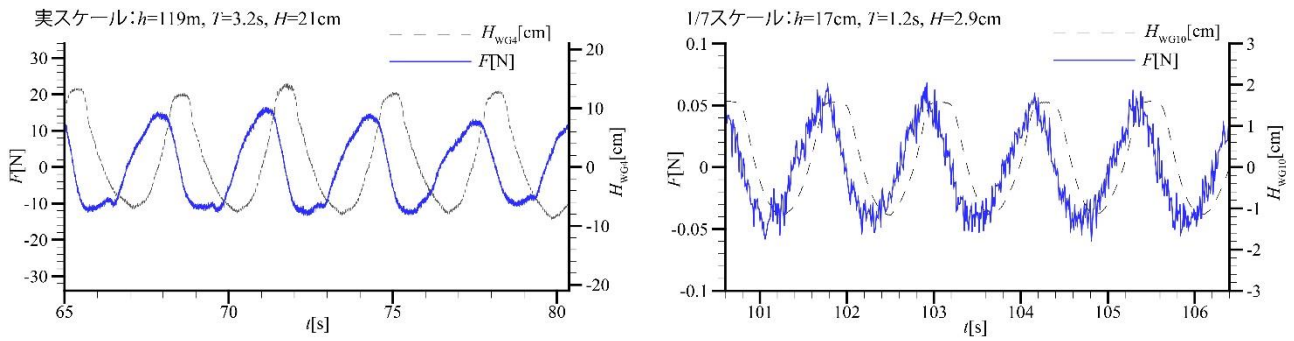


図4.6.4 規則波実験の樹木への作用波力（左：大規模実験、右：1/7スケール中規模模型実験）

図4.6.5に、先の大規模実験における樹木に作用する高さごとの波圧（動圧成分のみ抽出）を示す。いずれの高さも概ね同程度の値を示しており、波に対する乱れが少ないことが確認できる。

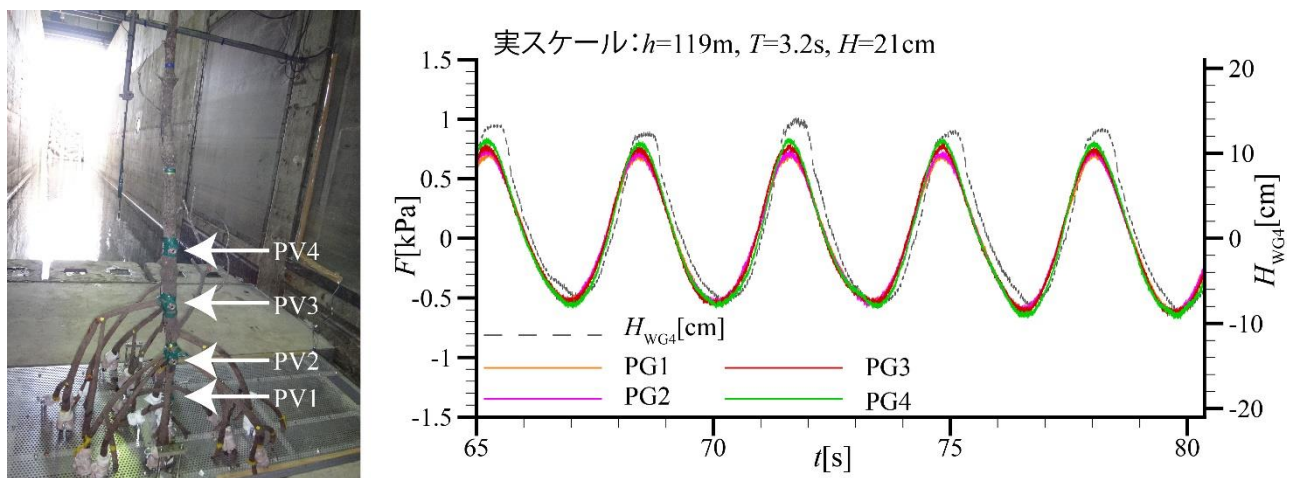


図4.6.5 大規模水理実験：作用波圧（ $h=100\text{cm}$ 、 $T=3\text{s}$ 、規則波 $H=30\text{cm}$ ）

高潮・高波の想定事例として、支柱根が完全に没水した水深 $h=150\text{cm}$ において、周期 $T=3\text{s}$ 、波高 $H=90\text{cm}$ の規則波を与えた。図4.6.6に、作用波力・波高及び実験のスナップショットを示す。樹木に作用する波力が增大するに合わせ、樹木が撓る様子がスナップショットの重ね合わせから確認できる。波力と波高の時系列グラフを見ると、波力がピーク値に近づくにつれて振動していることがわかる。また、水平波力はピーク後の低下が波高と比較して急勾配となっており、樹木の撓りによって、波力を受け流しながら波力を低下させている様子が見て取れる。こうした挙動は水理模型実験では見られず、実樹木は波に対して柔軟な応答を示すことが明らかとなった。

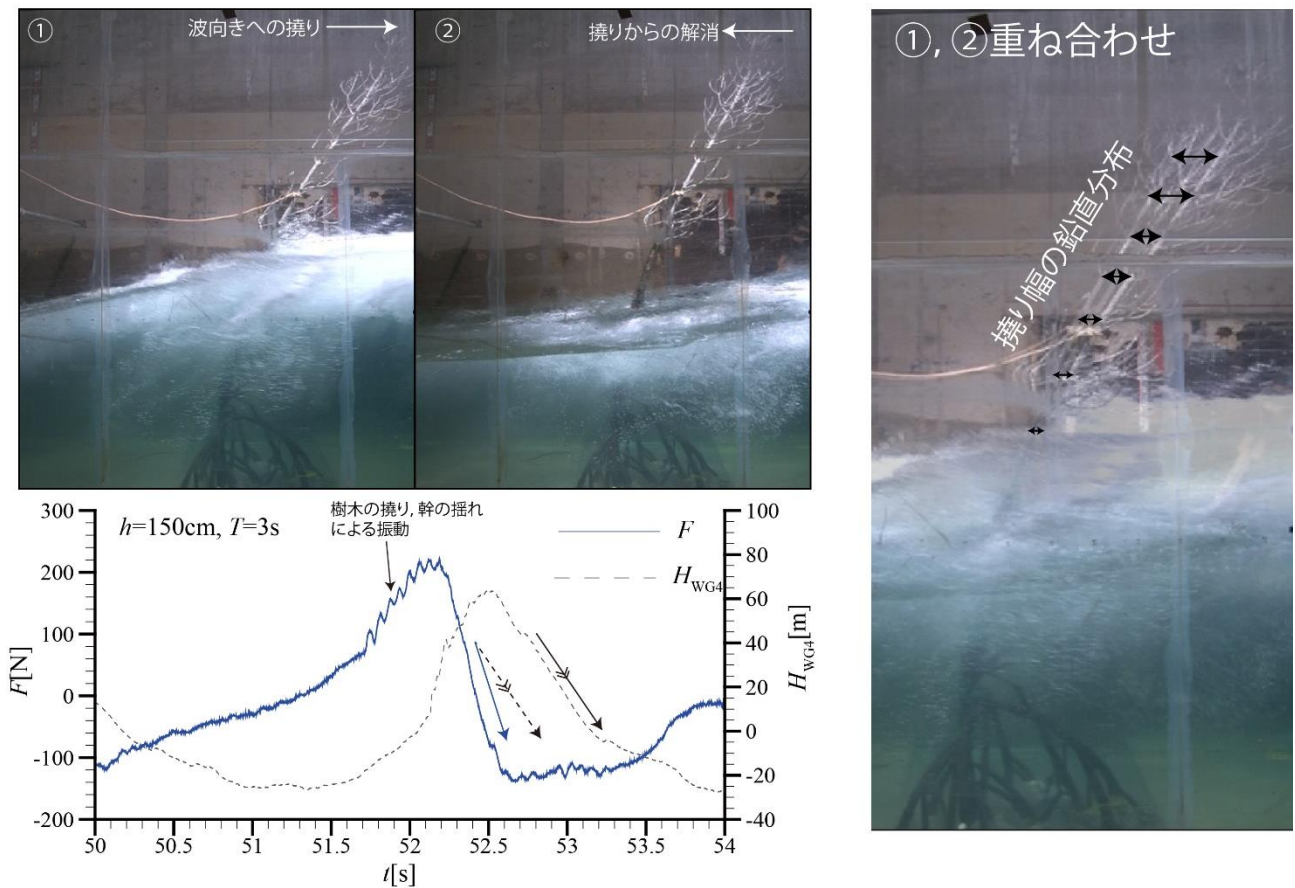


図4.6.6 大規模実験：規則波実験における樹木の撓り

波力を受けて樹木が撓る傾向は、波力が大きくなる津波の孤立波においてより顕著である。図4.6.7に、水深 $h=150\text{cm}$ の設定で孤立波を作用させた実験ケースにおける樹木の撓りが最大となる瞬間を抽出したスナップショットを示す。図からは、波高の増大に合わせて樹幹が徐々に大きく反る様子が確認できる。波高 $H=199\text{cm}$ では、根元から樹頭まで最大で 30° 撓り、枝下を除いた樹冠に限れば 45° 程度まで撓る。この条件下では、孤立波通過後に撓りは解消され、樹木は健全な状態を保っていた。一方、波高 $H=229\text{cm}$ の孤立波を与えた実験ケースでは、支柱根で座屈が生じて損傷を受けた（図4.6.8）。

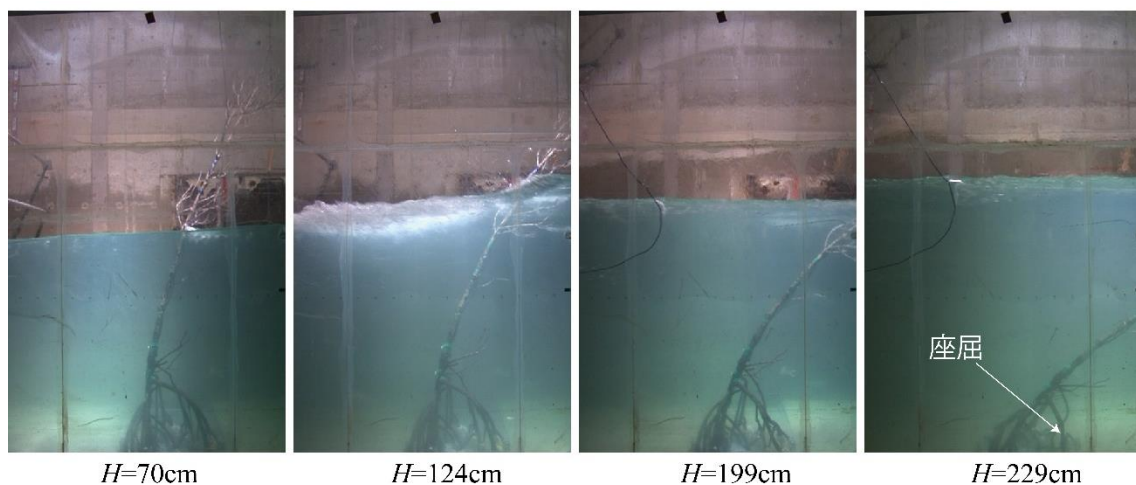


図4.6.7 大規模実験：孤立波実験における樹木の撓り

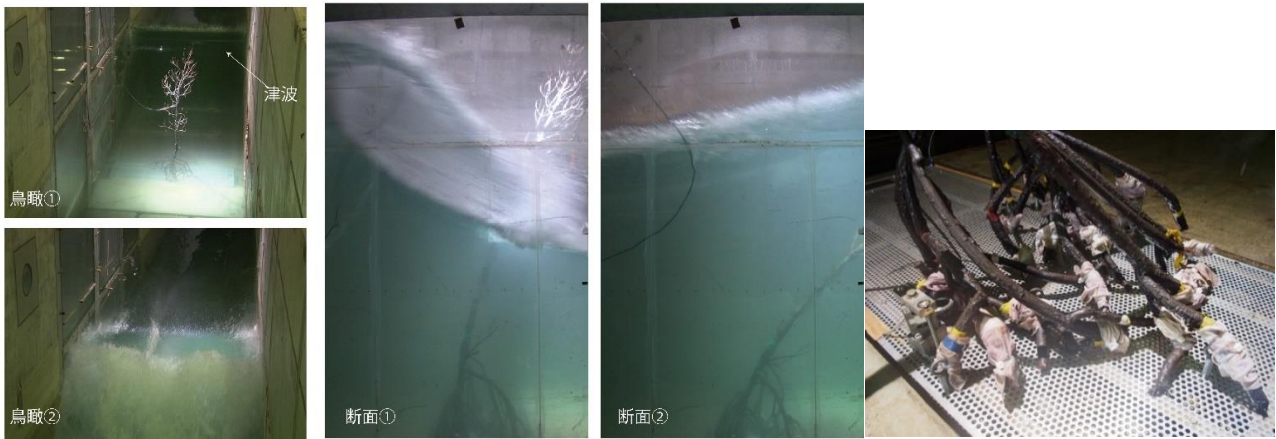


図4.6.8 大規模実験：孤立波（ $H=229\text{cm}$ ）による樹木の破壊状況

以下図に、孤立波（ $H=229\text{cm}$ ）作用時における樹木に作用する波力及び波圧の時系列グラフを示す。波力はピーク値が $F=1.54\text{kN}$ であり、支柱根付近で突出して波圧が大きくなる様子は見られない。なお、先の非破壊条件（波高 $H=199\text{cm}$ ）では $F=1.31\text{kN}$ の波力が作用しており、これらの中間値が破壊限界であった。

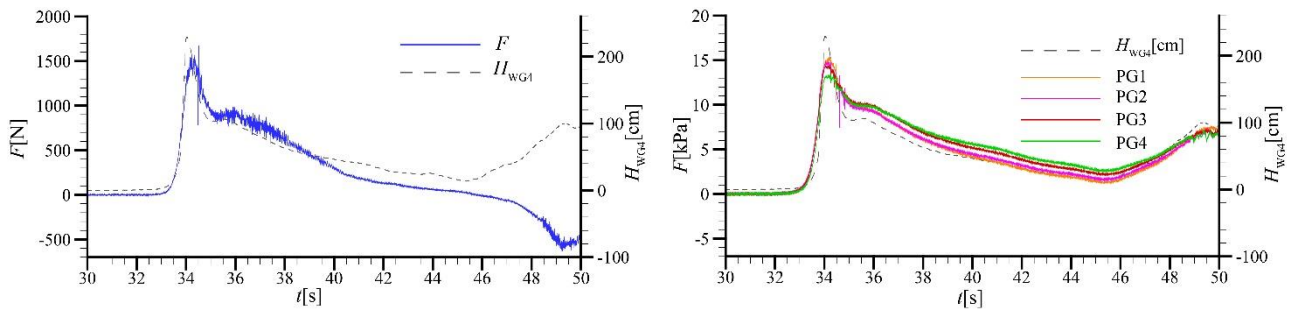


図4.6.9 大規模実験：孤立波（ $H=229\text{cm}$ ）作用時の樹木への作用波力（左）及び圧力（右）

(3) 樹木の载荷破断試験

先の水理実験では、根の座屈による損傷が見られた。次に、要素载荷試験を実施して、樹幹の破壊基準を検証した。先に、载荷試験後に行った試験体を各部位（下図参照）の含水率を表4.6.1に示す。先端部（樹頭側）に近い箇所では湿潤状態密度及び乾燥状態密度がより大きな値を示した。



図4.6.10 試験体の密度及び含水率の確認箇所

表4.6.1 試験体の密度及び含水率

番号	重量	重量含水率	体積含水率	生木状態密度	湿潤状態密度	乾燥状態密度
①	28g	68%	43%	1.07g/cm ³	1.16 g/cm ³	0.64
②	21g	67%	42%	1.06 g/cm ³	1.15 g/cm ³	0.64
③	37g	62%	44%	1.15 g/cm ³	1.23 g/cm ³	0.71
④	30g	63%	46%	1.17 g/cm ³	1.27 g/cm ³	0.73

以下図に、载荷試験における実験写真及び試験結果での荷重・曲げ応力・ヤング係数と変位の関係を示す。主幹先端部（樹頭側）は樹径 $d=23.0\text{mm}$ で、主幹中央部は樹径 $d=37.5\text{mm}$ であった。塑性変形は、

主幹先端部で 50.0kg、主幹中央部で 100.5kg の载荷時点で開始された。曲げ応力、曲げヤング係数を見ると、主幹先端部は、先端中央部より曲げ応力に対する耐久性が高く、曲げヤング係数が高い値を示した。部位によるこの特性の違いが、波に対する樹木の撓りを大きくしているものと考えられる。

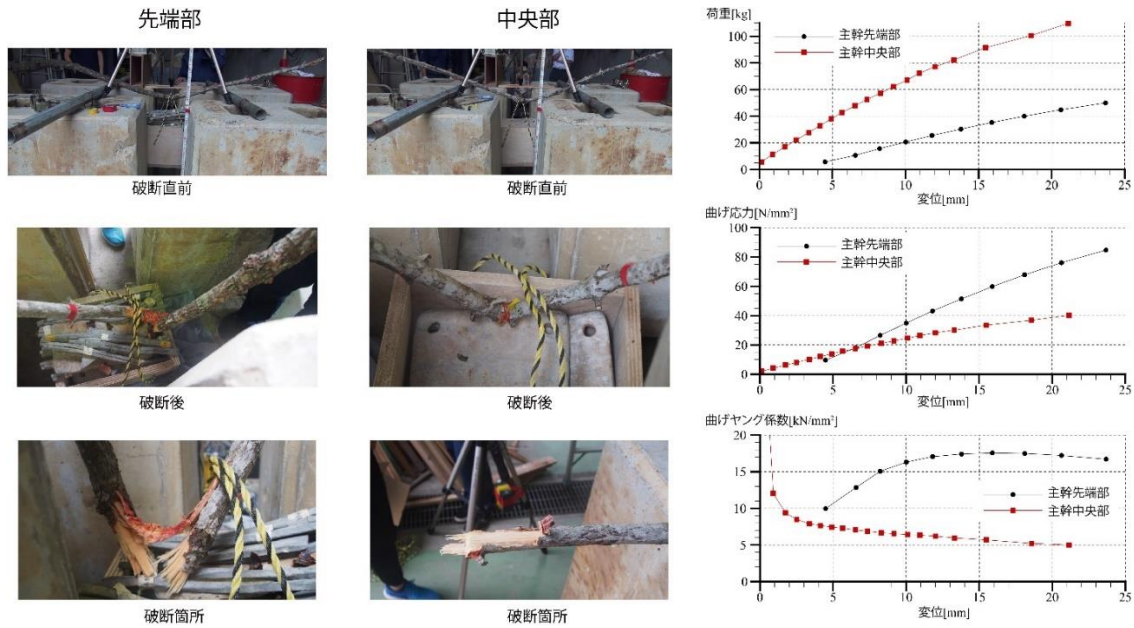
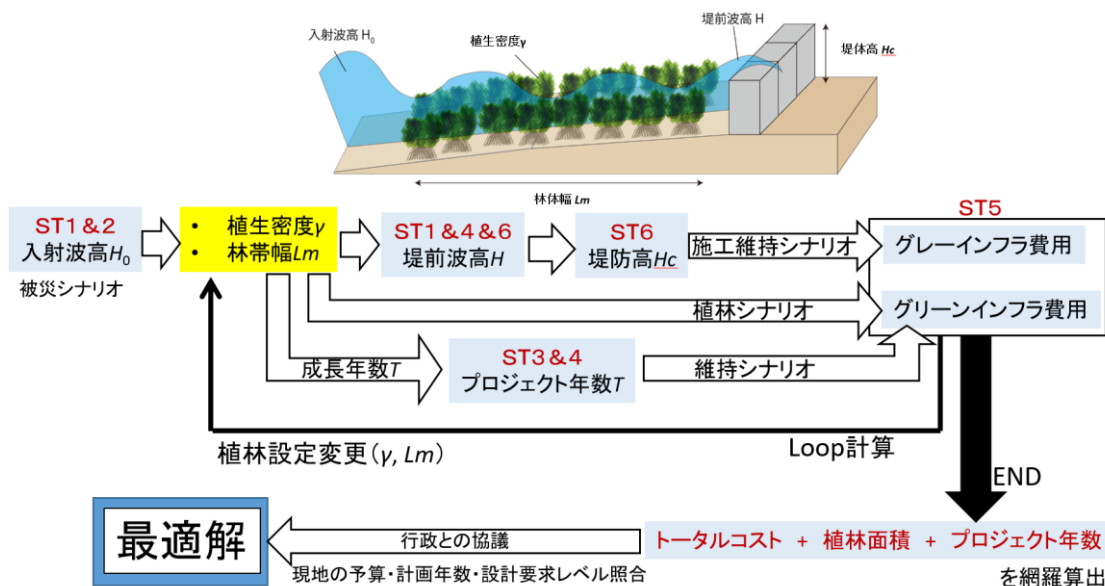


図4.6.11 载荷破断試験：実験写真及び試験結果での荷重・曲げ応力・ヤング係数と変位の関係

(4) グリーンインフラ及びグレーインフラの最適な組み合わせの検討（アルゴリズムの構築）

グリーン・グレーインフラの組み合わせは、現地行政側の要求仕様に沿って柔軟に対応が可能な枠組みを構築することが重要である。また、要求仕様の決定にあたり、現地行政側が予算、防護性能、年数・土地利用面積等を選別するための判断材料を提供できることが望ましい。そのため、グリーン・グレーインフラの複数の組み合わせ事例の効果を俯瞰できるデータセットが求められる。これを実現すべく、以下図のフローチャートを作成し、グリーンインフラの設定（植林密度 γ ・林帯幅）とグレーインフラの設定（断面総量）に対して、各単価に対応する断面あたりの施工費用の概算方法について検討した。



※図中のST番号は、関連する参考材料が提供される各サブテーマを示している

図4.6.12 グリーンインフラとグレーインフラの最適な配置決定のためのフローチャート

グレーインフラについては、国内の技術基準を参考に、堤防延長1m当たり単位時間当りの平均流量すなわち越波流量を基として堤防の必要高さを決定することとする。海岸堤防、護岸、防波堤等の背後地には、許容越波流量が施設の重要度に合わせて設定されるが、ここでは、人家散在、工場等の重要地区に適用される $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ を許容越波流量¹¹⁾とし、グリーンインフラ及びグレーインフラの設定ごとのコスト試算を実施した。前節までの水理実験から、グリーンインフラを含む現地の地形及び海象条件を反映できる高精度な予測シミュレーションモデルをWG1との連携から構築したが、ここでは簡単のため、既往実験のデータ⁹⁾を用いて便宜的に波高減衰量を導いた(図4.6.13参照)。

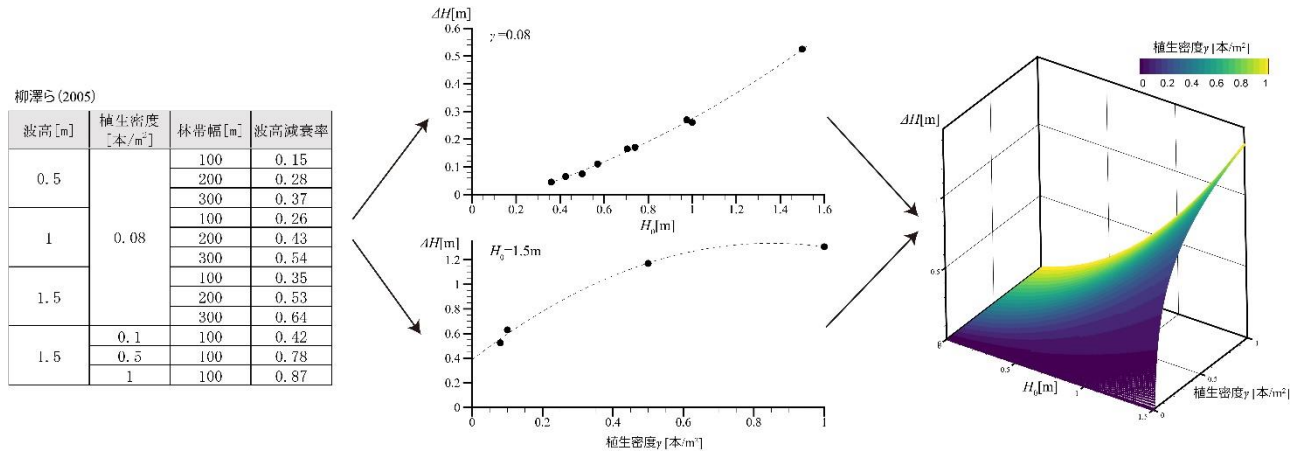


図4.6.13 林帯幅100m当たりの波高減衰量の誘導例

得られた波高・植生密度・波高減衰量との関係から、設計潮位及び設計波高(ここでは、便宜上 $h=3.0\text{m}$ 、 $H_0=1.5\text{m}$) に対してグリーンインフラの林帯幅・植生密度・波高の関係を計算より求める(図4.6.14)。グレーインフラの堤体高については、以下の越波流量式¹²⁾

$$\frac{q}{\sqrt{gH^3}} = \begin{cases} 0.018 \left(\frac{R_{max}}{H}\right)^{\frac{3}{2}} \left\{1 - \left(\frac{R_c}{H}\right) / \left(\frac{R_{max}}{H}\right)\right\}^{3.2} & \text{for } 0 \leq R_c \leq R_{max} \\ 0 & \text{for } R_{max} \leq R_c \end{cases}$$

を利用して、同様に図4.6.15の海象条件に対する必要堤体高の関係図が得られる。

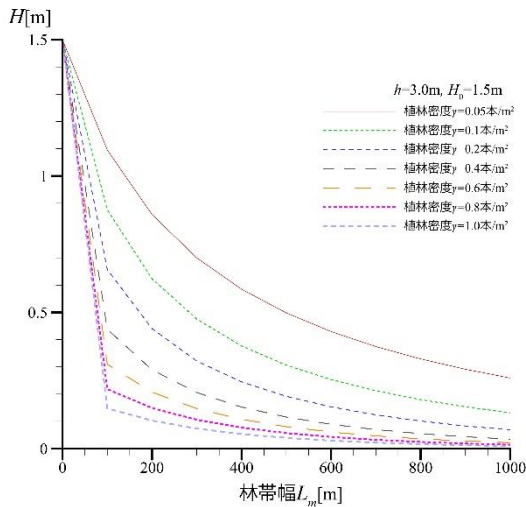


図4.6.14 林帯幅と減衰後の波高

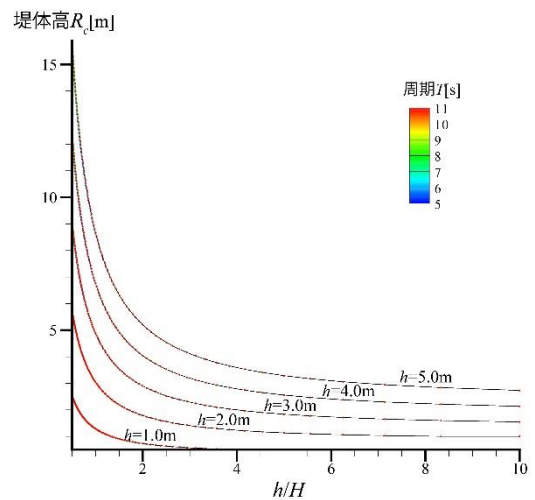


図4.6.15 海象条件と必要堤体高

ここで、図 4.6.14 で得られる堤前波高 H を図 4.6.15 へ代入することで、林帯幅・植生密度に対する堤体の必要高さが図 4.6.16 のように得られる。また、図 4.6.16 に、各インフラの必要単価を導入すれば、施工費の概算が網羅的に俯瞰できる。ここでは、試験的に植林コストを 500 円/本、堤体（天端幅 10m、法面勾配 1:1.5 を仮定）の施工コストを 1000 円/㎡とした場合の単位断面当たりのコストを図 4.6.17 に示す。図から、植林密度を低くかつ林帯幅を長く取るほどコストが安くなる傾向が見られる。ただし、一定幅を超えると逆にコストは上がることが分かる。土地利用の観点から、林帯幅や堤体高に制限がある場合は、本グラフから許容範囲を限定して最安値を検索すれば最適コストが導ける。

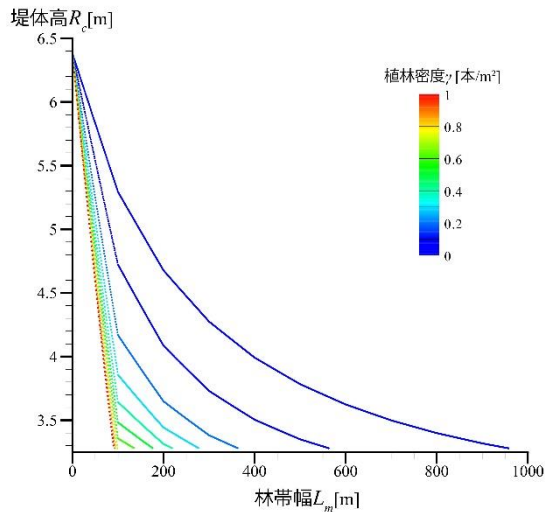


図 4.6.16 林帯幅と必要堤体高

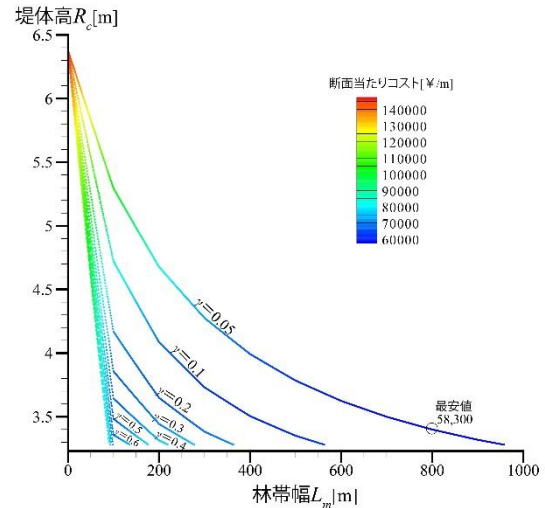


図 4.6.17 インフラの組み合わせ毎のコスト

また、ライフサイクルコストを検討する場合には、グリーンインフラの自生による林帯幅拡幅やグレーインフラの更新についても考慮する必要がある。森林距離の拡大データ (ST4 参照) から、ここに 1.9m/年を期待値として織り込むと、プロジェクト年数 20 年の場合、林帯幅の自生による拡幅 38m を考慮して算出されるコストは図 4.6.18 のように修正される。一方、グレーインフラの更新については、更新時期における拡幅後の予測林帯幅を用いて、図 4.6.16 との照合から堤体高の節減を試算することも可能である。図 4.6.19 は、40 年後を更新時期とした場合の堤体高の予測削減量である。なお、ここでは簡単のため人工的に植林した林帯部の成木までの成長速度を考慮していないが、実際には植林部の成長年数を引いた期間を林帯幅の追加的な拡幅期間と位置づける等の調整が必要である。

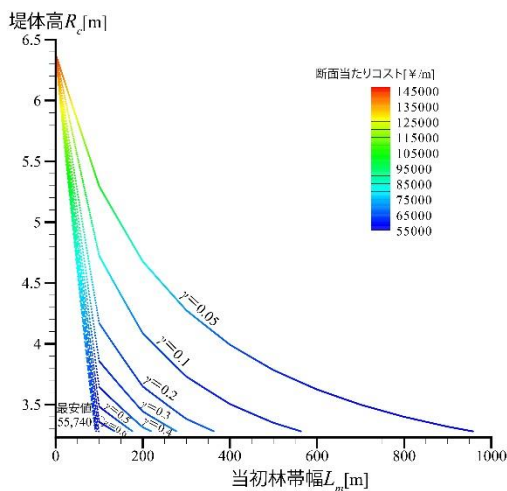
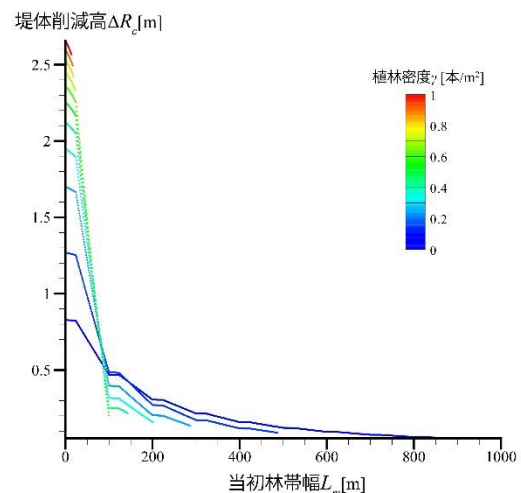
図 4.6.18 インフラ組み合わせ毎のコスト
(20 年後の森林拡幅考慮)

図 4.6.19 40 年後更新時の堤体高節減可能量

こうした更新時期やプロジェクト年数などの長期にわたる試算には、人件費等の増大も織り込む必要があるため、各インフラの単価変動による戦略の違いを把握する必要がある。そこで以下図に、単価の違いによる最安値を取る際の林帯幅を示す。林帯幅は最大 2km としてある。また、先のコスト試算では植林単価を一律同額で設定したが、ここでは植林箇所による単価の変動も導入して試験的に以下式を用いて追加計算を行った。

$$\text{植林単価} Y(x) = \alpha x$$

ここに、 α ：基礎単価、 x ：植林箇所（岸からの距離）である。

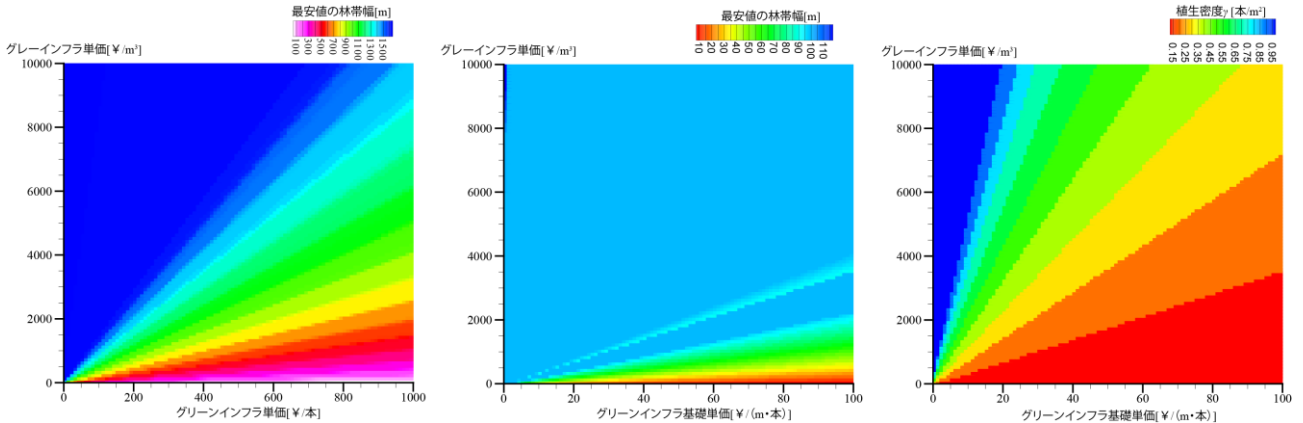


図4.6.20 単価ごとの最適な林帯幅（左：植林単価固定、中央・右：植林単価変動）

図 4.6.20 左の植林単価固定と比較すると、図 4.6.20 中央の植林費用を距離に応じて変動させた場合には、グレイインフラの寄与率の上昇が著しくなる。また、植林単価を固定した場合には、最適な植林密度 γ がここで設定した最小値 $\gamma=0.05$ を一貫して取るのに対し、植林単価を距離に応じて変動させた場合には、最適な植林密度は各インフラの単価ごとに変動する（図 4.6.20 右）。ここでは、植林費用の変動式を単純化したが、現地の単価相場と比較して適切な値を導入することで、より現実に則した概算が可能となる。

5. 本研究により得られた成果

本サブテーマでは、水理模型実験により、マングローブ周囲の詳細な波や流れを調べた。また、グリーンインフラによる減災価値をモデル化し、更にグレイインフラを併用した場合のコスト・ベネフィット関係の評価を行った。

(1) 科学的意義

グリーンインフラとグレイインフラの最適な組み合わせを導くために必要となる、グリーンインフラの波高減衰効果とグレイインフラに与える影響について水理実験を通して従来と比較してより高精度な定量データを取得した。

これまでの既往研究では、複雑な形状を有するマングローブに対して単純な円柱群模型や簡易的なモデル化が施された模型を用いて水理模型実験が実施されていたため、再現性に関して議論の余地を残していたが、本研究では、3Dスキャナ（ST4提供）及び3Dプリンター（ST1提供）により実樹木を詳細に再現した3次元模型を用いることで、マングローブ林が波に与える影響について従来と比較してより高精度なデータを取得した。更には、実樹木を用いたマングローブの大規模水理実験を実施して、これまで明らかでなかった樹木個体に実際に作用する実際の波力や波圧を検証するとともに、樹木の波に対する応答特性（樹幹の撓り）や、津波による破壊過程と破壊限界を明らかにした。これらは、いずれも同様の手法による研究事例がなく、関連分野における基礎データとして科学的意義の高いものであると考えられる。また、ST1との連携から、取得したデータを基に数値シミュレーションモデルの構築を行い、マ

ングローブ林の影響を考慮した波浪計算が可能な枠組みを構築するなど、既に実験データの応用研究へと進んでいる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

「特に記載すべき事項はない。」

<行政が活用することが見込まれる成果>

本サブテーマでは、ライフサイクルコストを考慮したグリーンインフラとグレーインフラの最適な組み合わせを導くためのアルゴリズムを構築しており、先に示したグリーンインフラの波高減衰効果の定量的なデータと併せて、今後のグリーンインフラを設計するための参考になるものと考えられる。

これまで、国内において、海岸林の整備では防潮林としての防護機能に関する具体的かつ定量的な設計手法に言及する技術基準がなく、整備計画は必ずしも効果的であるという保証を立てることができなかった。本研究では、グリーンインフラを防護施設の一部として設計へ織り込むための波高減衰や被災過程に関する検討を実施し、今後の整備計画に活用可能なデータを蓄積した。さらに、防護施設としてグレーインフラと組み合わせた際の最適な配置・組み合わせについてライフサイクルコストを考慮した算定方法を構築するとともに、適用例を示すことで、具体的なアプローチ方法について提案した。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Chang, C.W, N. Mori, N. Tsuruta, K. Suzuki (2019) Estimation of Wave Force Coefficients on Mangrove Models, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.75/2, p. I_1105-I_1110. (ST1と共同)

<その他誌上発表（査読なし）>

(2) 口頭発表（学会等）

※発表済みのもの又は確実に発表する予定のものにとどめてください。

- 1) Tsuruta, N. (2018) Application of new technology to design and maintenance of port structures, the 6th KIOST-PARI-CDIT-WAVE Joint Workshop Program, Fukuoka, Japan.
- 2) Che-Wei Chang, Naoki Tsuruta, Kojiro Suzuki, Nobuhito Mori (2018) An experimental study on water waves through model mangrove forests, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) annual meeting, Hawaii. (ST1と共同)
- 3) Chang, C.W, N. Mori, N. Tsuruta, K. Suzuki (2019) On the Interactions between Water Waves and Mangrove Trees: Physical Modeling in Two Scales, AOGS2019, Singapore, 2019/7. (ST1と共同)
- 4) Chang, C.W, N. Mori, N. Tsuruta, K. Suzuki (2019) Estimation of Wave Force Coefficients on Mangrove Models, 海岸工学講演会, 2019/10, 鹿児島市. (ST1と共同)

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

7) 毎日新聞 (2018年6月, 全国版, 「マングローブ実験」) (ST1と共同)

8) 日経 xTECH/日経コンストラクション (2019年3月, 「期待の新インフラ「樹木」、減災評価手法の確立へ」) (ST1と共同)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 23) 佐藤創・鳥田宏行・真坂一彦・阿部友幸・野口宏典・木村公樹・坂本知己：東北太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林の被害—三沢市織笠の事例—, 平成 23 年 度日本海岸林学会石巻大会講演要旨集、7-8, 2011.
- 24) 星野大介・坂本知己：東北地方太平洋沖地震津波における海岸林の破壊状況と防潮機能の実証 —三陸北部沿岸地域—, 森林立地 56(1), pp.7-19, 2014.
- 25) 野口宏典・佐藤創・阿部友幸・鳥田宏行・真坂一彦・木村公樹・鈴木覚・宮前崇・落合博貴・坂本知己：数値実験による海岸林の津波氾濫流減衰機能の検討—水路実験によるクロマツ抵抗特性と被災地の林分・地形条件を用いて—。日本森林学会大会学術講演集、123、p. D06、2012。
- 26) 仰木重蔵・坂口勝美・中野秀章・檜山徳治・岩川幹夫・藍野祐久・日塔正俊：伊勢湾台風下における三重・愛知両県下の海岸防災林の効果と森林の潮風害に関する調査報告, 林業試験場研究報告第127号, 1961。
- 27) 首藤伸夫：防潮林の津波に対する効果と限界, 第32回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp.465-469, 1985。
- 28) 原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦：防潮林の津波に対する減衰効果の検討, 海岸工学論文集, 土木学会, 第47巻, pp.366-370, 2000。
- 29) 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 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, I_361-I_365, 2013。
- 30) 田中規夫・佐々木 寧・湯谷賢太郎・Samang Homchuen：津波防御に対する樹林幅と樹種影響について—インド洋大津波におけるタイでの痕跡調査結果, 海岸工学論文集 52, pp.1346-1350, 2005.
- 31) 柳澤英明・横木裕宗・三村信男：マングローブ林による波浪減衰効果の実験・数値的検討, 海岸工学論文集 52, pp.1026-1030, 2005.
- 32) Husrin, S., Strusinska, A., and Oumeraci, H. :Experimental study on tsunami attenuation by mangrove forest, Earth Planets Space, Vol.64, pp.973-989, 2012.
- 33) 合田良実・竹田英章：不規則波に対する護岸の期待越波流量について, 第15回海岸工学論文集、pp.259-266, 1968.
- 34) 玉田崇・間瀬肇・安田誠宏：波の打上げを考慮した越波流量算定法の提案, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.926-930, 2010.

III. 英文Abstract

Development of Coastal Disaster Reduction Assessment Method by Green Infrastructure considering Climate Change

Principal Investigator: Nobuhito Mori

Institution: Kyoto University

Disaster Prevention Research Institute,

Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, JAPAN

Tel: +81-774-38-4321 / Fax: +774-38-4321

E-mail: mori.nobuhito.8a@kyoto-u.ac.jp

Cooperated by: NEC, National Institute for Environmental Studies, Tohoku Gakuin University, Ibaraki University, Port and Airport Research Institute

[Abstract]

Key Words: Coastal disasters, Mangrove, Green infrastructure, Eco-DRR, Global warming, Climate change, Adaptation

Storm surges and waves caused severe coastal disasters in the Asia Pacific. We developed a coupled atmosphere-storm surge-wave (WRF-ROMS-SWAN) model and updated parameterization at the air-sea interface. The sensitivity of TKE flux parameterization to tropical cyclones was examined targeting super Typhoon Haiyan (2013). We developed a new technique to simulate tropical cyclones considering arbitrary tracks and climate change, and a Boussinesq-type model incorporating mangrove effects to study coastal waves.

We developed and optimized a high-resolution, high-speed coupled atmosphere-storm surge-wave model on Earth Simulator to understand damage by super typhoons. Using 353 nodes, 21.7 hours is used to simulate 5-day high-resolution typhoon Haiyan. We ran simulations using original topographic data and virtual topographic data (the same data serially displaced from -2 degrees to +5 degrees in latitude). The latter helps understand damage by various tracks and landing points.

We organized map information of coastal areas in the Philippines, including mangrove distribution, constituent biota and topography, and conducted typological analyses that help make guidelines for ecosystem-based adaptation to climate change. We conducted cultivation experiments and field surveys to obtain parameters for time-varying plant shape and physiological functions under global-warming scenarios, which enable model projection of mangrove effects on coastal protection.

We investigated structural characteristics of mangrove prop roots using a 3D laser scanner. The 3D data provided the vertical distribution of volume and projected area of mangroves, and was used in hydraulic experiments and numerical simulation. We developed a growth-rate curve of mangroves to estimate their time-varying effects on wave reduction, showing mangrove forests can

reduce 14% of the hydraulic force of bore in 15 years and 27% in 80 years.

It is important to understand whether mangrove afforestation and dikes protect tropical/subtropical coastlines efficiently and economically, while few national-level studies examined their long-term feasibility and impacts. We conducted cost analyses for the Philippines and Vietnam. Mangrove forests with dikes were potentially effective in Vietnam where inundation extent and consequent economic damage is projected to increase. Conversely, the feasibility in the Philippines was lower, requiring site-specific management for local conditions.

Using a real mangrove from Iriomote Island, we conducted experiments, studying wave forces on the mangrove and its characteristics. With the experimental results and investigation from sub-theme 1~5, we developed a new approach to estimate the life-cycle cost of gray-green-mixed infrastructures based on tolerable wave overtopping discharge of coastal defenses, which helps optimize combined gray-green infrastructures.