

課題番号：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 京都大学・森 信人

発表 NEC・撫佐昭裕

NEC・国立環境研究所・東北学院大学
茨城大学・港湾空港技術研究所

発表内容

- ①表紙：研究課題番号、課題名、研究代表者名、所属、研究実施期間、研究経費（累計額）
- ②研究体制（サブテーマ毎に研究機関名と研究者分担者名（研究協力者を除く）を記載）
- ③研究開発目的
- ④本研究により得られた主な成果（科学的・技術的意義等の観点から作成）
- ⑤本研究により得られた成果の主な活用（環境政策への貢献等の観点から作成）
- ⑥「国民との科学・技術対話」の実施（実施していない場合は記載不要）
- ○発表する内容は環境研究総合推進費の予算で実施した当該研究成果に限定してください。

背景：アジア・太平洋における 近年の台風・沿岸災害とマングローブ植林

台風被害



■ 2013年台風Haiyan

- 死者：約6,200名
- 経済損失：23億USD

■ 現状

- 北西太平洋の台風特性の
変化（強い台風が増加？）
- 比国：World risk indexで
世界3位の危険性
(国連大学, 2016)

■ 将来予測 (アジア開発銀行)

- 比国：2090年までに約34兆
7248億円の被害
(海面上昇込)

マングローブ植林



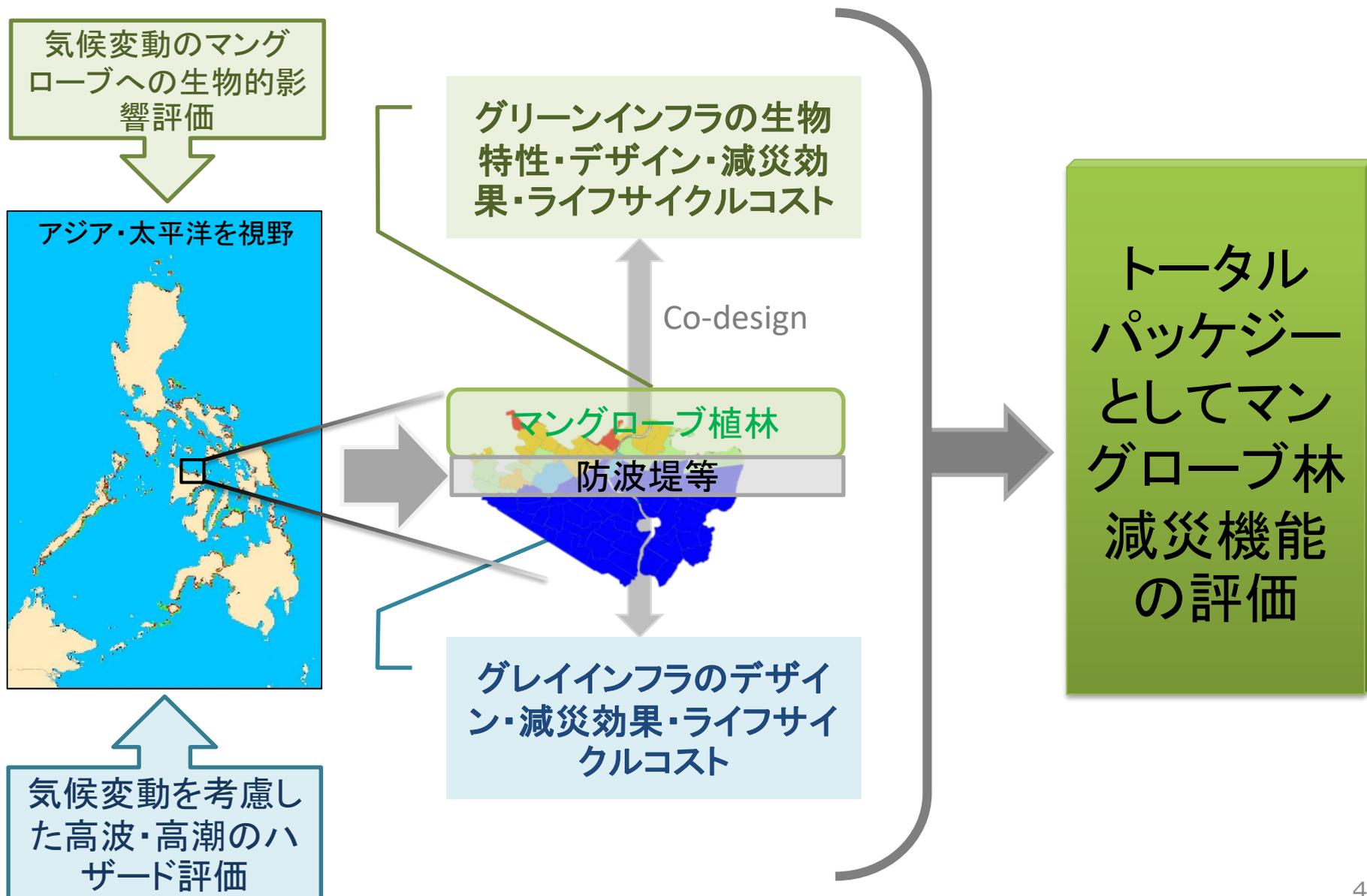
■ 特徴

- 二酸化炭素の固定効果、
多様な生物種の保存
- 緩和策として実施
- 民間財団CSR他
- 2004年インド洋大津波以降
減災効果も注目される
Eco-Disaster Risk
Reduction (Eco-DRR)

■ 問題点

- JICA等で適応策としても実施
- 適応策としてのハザード評価・
機能評価についての科学的知見
の不足

研究ターゲットと得られる成果のイメージ



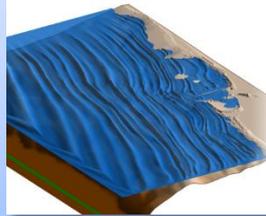
Sub1,2

コア技術

温暖化に伴う台風特性の変化と高潮・高波評価モデル開発

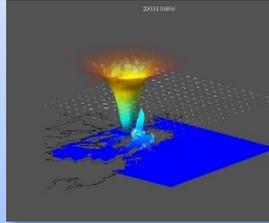


マングローブを考慮した高解像度波浪モデル



京大・NEC

スーパーコンピューターにおける高速化



マングローブの植物的特性・物性 + 温暖化の影響



要素技術

Sub3,4

マングローブの生物・物理実験



マングローブの要素モデリング

$$D_{veg,i} = \frac{1}{2\sqrt{-}} \rho \tilde{C}_D b_v \cdot N \left(\frac{kg}{2\sigma} \right)^3$$

国環研・東北学院

Sub5,6

社会実装技術

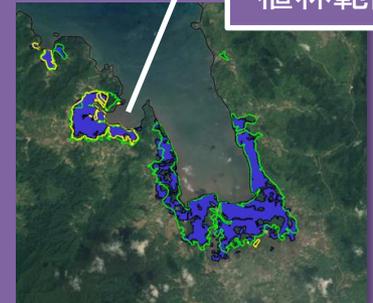
ライフサイクルコスト推定モデル

- グリーンインフラ/グレーインフラ
- 初期投資
- メンテナンス費
- 機能の時間変化



地域・外力毎の適応技術の最適化についての手引き作成

植林範囲等

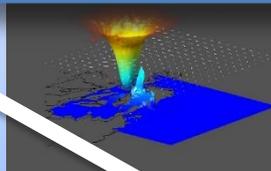
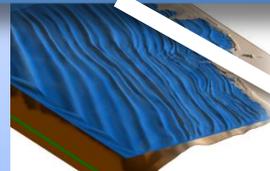


港空研・茨城大

Sub1,2

コア技術

ハザード評価(マクロ・詳細)
グリーンインフラの効果



京大・NEC

Sub3,4

要素技術

マングローブの
物理的特性

マングローブの
生物的特性

マン
植物
+温

Sub5,6

社会実装技術

植林の最適化
植林後の減災効果と
時間変化

ターゲットサイト
1. ハザード評価
2. グリーンインフラの効果
3. ライフサイクルコスト

地
応
に
作

港空研・茨城大

(計画) コア技術

サブテーマ 1,2 数値モデル開発

1. ハザード特性の解析

- 年発生頻度・n年発生強度

2. 数値モデル開発

- A) 大気・高潮（海洋）・波浪
結合モデルの開発
- B) マングローブを解像する位相
解像型浅海波浪モデルの開発

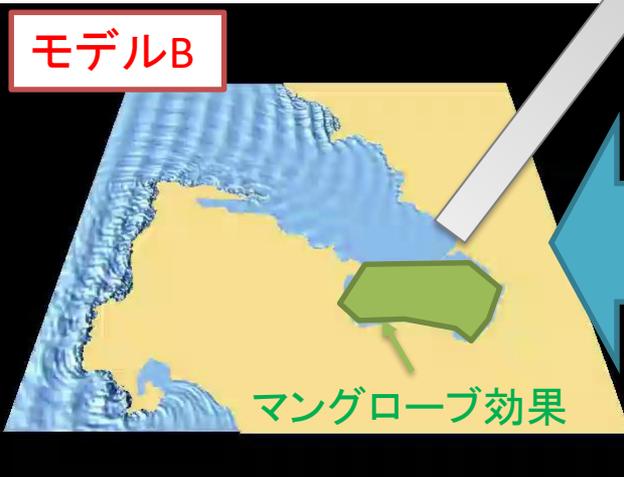
3. モデルの超高速化

- 沿岸域高解像度計算の実現
 - ✓ マルチモデル・ネスティングを可能に
 - ✓ 時空間解像度を5倍：O (1km)
- 最新スーパーコンピュータに
適したモデル開発
 - ✓ ベクトル化・高スケーラビリティ
モデルの開発
 - ✓ 演算領域のネスティングによる
演算量の最適化

地球温暖化を考慮した将来気候条件



期待される成果
与えられた立地条件に
対し、マングローブ林に
よる波浪・高潮減衰の影
響を定量的に評価



- 要素技術：サブ
テーマ3・4
- モデル係数
- 社会実装技術：サ
ブテーマ5・6
- マングローブ林
の立地条件

(成果) : コア技術(ST1,2)

数値モデル開発

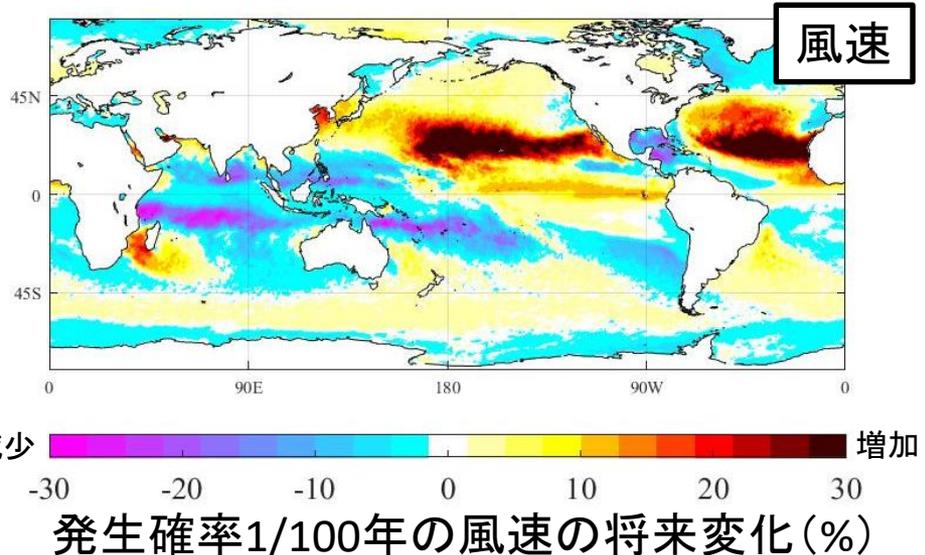
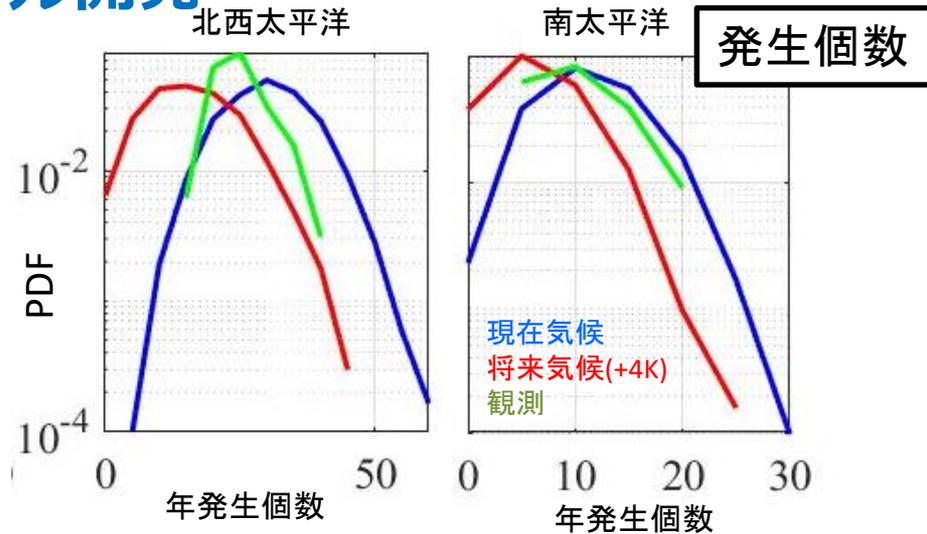
ハザード特性の解析結果

■ 対象データ

- IPCC第5次評価報告書用データセットCMIP5
- 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)

■ 得られた結果：将来変化

- 台風の発生個数
 - 北西太平洋では+4Kで35%減少, 南太平洋では+4Kで27%減少 (d4PDF)
- 台風の中心気圧・風速, 高潮偏差
 - 1/100年風速の将来変化は、±20%程度増加と減少する2海域にわけられる. (d4PDF)
 - RCPシナリオに準じて気圧低下はシビアになる. (CMIP5)
- 将来気候の大気・海洋場
 - DS計算のためにCMIP5データの整備を実施した.



(成果) コア技術 サブテーマ 1,2 数値モデル開発

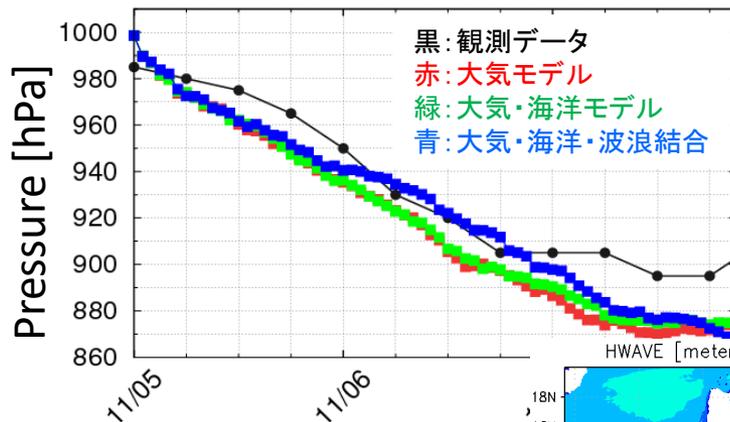
■ 大気・海洋・波浪結合モデルの開発

- 2013年台風Haiyanを対象
 - ✓ 境界値の整備 (特に海洋: SODA)
- 結合方法による台風再現性のチューニングを実施
 - ✓ 地表面境界層スキームによって海洋・波浪の大気への影響が違ふ
- 地形をずらして任意の地点に上陸可能にした
- 将来気候条件でシミュレーションを可能とした

■ 結合モデルの高速化

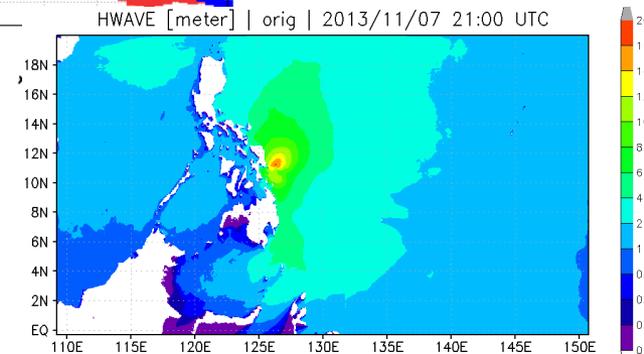
- コードを地球シミュレーターに移植 (JAMSTEC特別推進課題に採用)
- 地球シミュレータ512ノードを使用し, 実行環境を整備
- 実行時間の大幅な短縮
PCクラスタ: 19.5日 → ES: 18時間

sea level pressure[hPa] at center of typhoon T1330

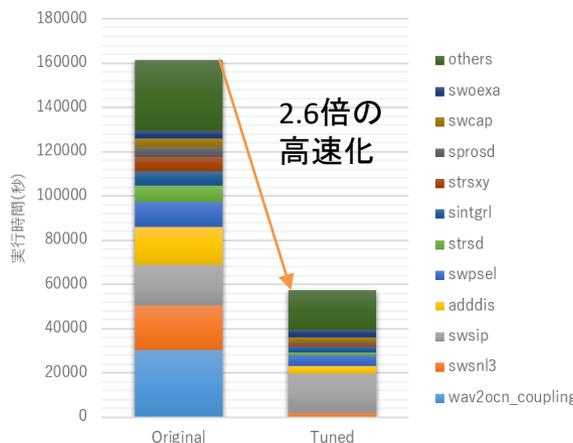


上陸時の波高分布

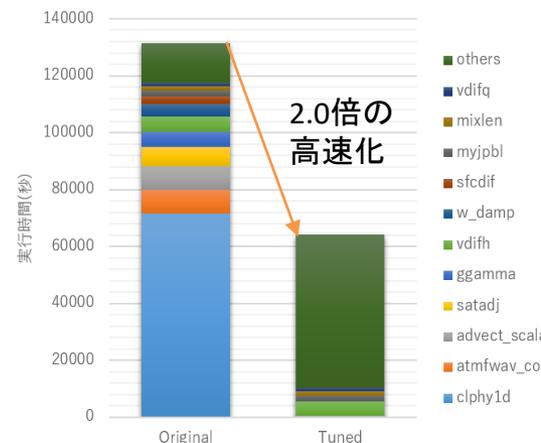
2013年台風Haiyan



波浪モデル(SWAN)



大気モデル(WRF)



AOW Model/COAWST base model by Warner et al.(2009)

ベクトル化効率95%, 1倍 → 2.25倍と高速化



京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

(成果) コア技術

サブテーマ 1,2

数値モデル開発

■ マングローブの効果を検討した位相解像型の波動モデル開発

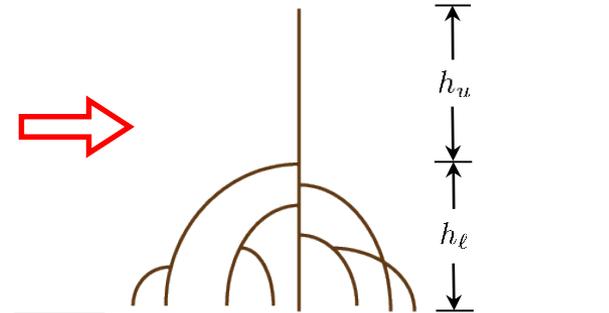
- Boussinesq方程式をベース
- マングローブによる減衰力を抗力および慣性力として考慮
- マングローブの根張りの鉛直構造を考慮したパラメタリゼーションを実施

■ モデルのチューニング

- マングローブを中心としたモデル係数についての文献調査
- 他サブテーマ4,6実施の水槽実験からの知見を活用 (実験にも参加)
- マングローブによる減衰効果を評価可能とした



樹木のパラメタライズ

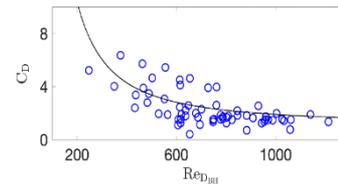


$$R_{veg} = \frac{1}{2(h+\eta)} \int_0^{\min(h+\eta, h_v)} C_D N_t u(z) \cdot |u(z)| dA_t(z) + \frac{1}{(h+\eta)} \int_0^{\min(h+\eta, h_v)} C_M N_t \frac{\partial u(z)}{\partial z} dV_t(z)$$

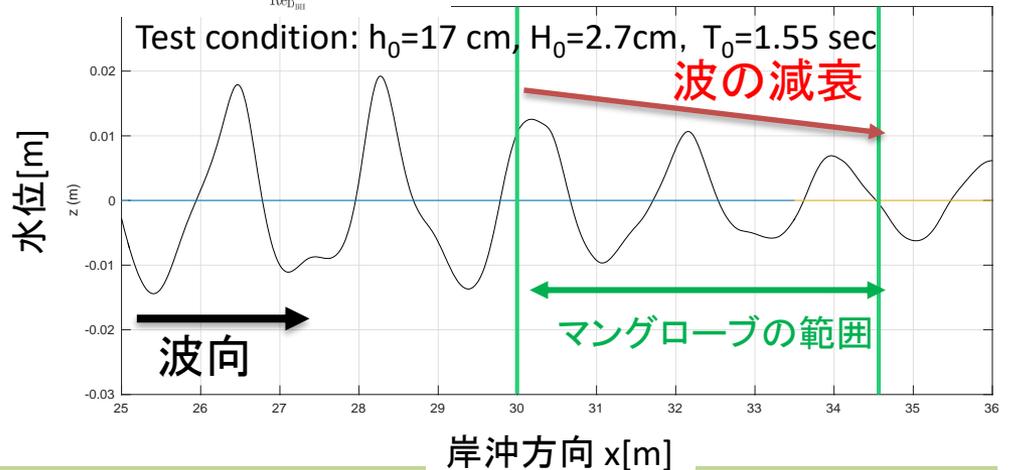
Stem density

Submerged volume – varying in vertical direction

Frontal area – varying in vertical direction



水槽実験の再現計算



(計画) 要素技術

サブテーマ 3, 4

マングローブ特性把握

1. マングローブ分布の把握と機能評価

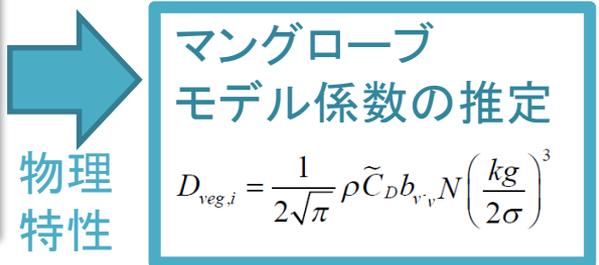
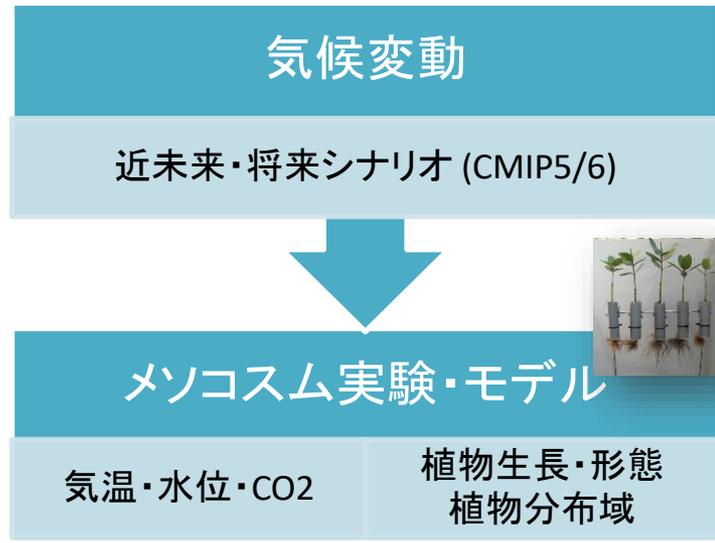
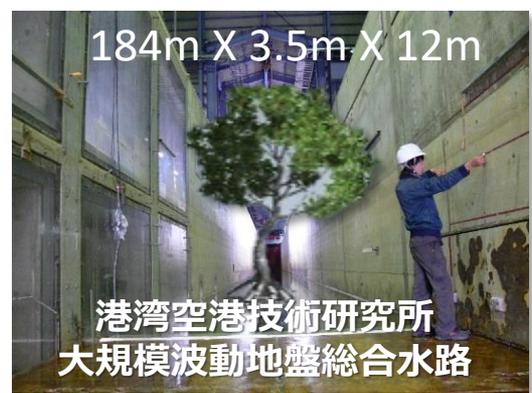
- マングローブ生態系分布情報
 - ✓ 現地踏査・画像解析により、分布状況をマッピング
 - ✓ 構成樹種のデータ整備
- 気候変動による生長・形態影響
 - ✓ 栽培実験・野外調査により植物の応答を明らかにする

2. マングローブ波浪低減効果

- 波浪低減効果の実験的検討
 - ✓ 3Dスキャナ・プリンターを利用した高精度マングローブ模型の作成
 - ✓ 実物・模型による水理模型実験
- 波浪低減効果の数値的検討
 - ✓ モデル係数・数値モデルの開発



社会実装技術
サブテーマ5・6



(成果) 要素技術 サブテーマ 3, 4 マングローブ特性把握

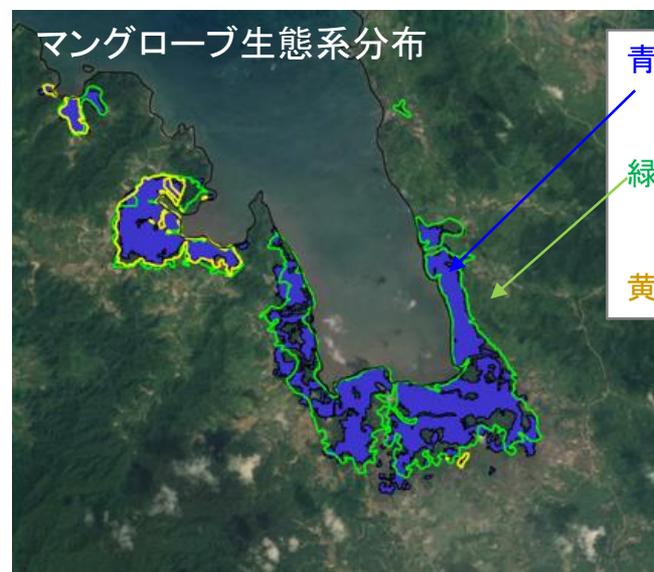
■ マングローブ生態系分布を把握

(フィリピンを対象に実施)

- 国環研提供TroCEP (全球)によるマングローブ域データを高精度化
 - ✓ 高解像度衛星データ+現地情報
 - ✓ 13-15年前の分布図 (TroCEP) と変化を確認
- 構成樹種情報を整理
- 他地域でも展開可能な手法として確立

■ 沿岸地形を類型化

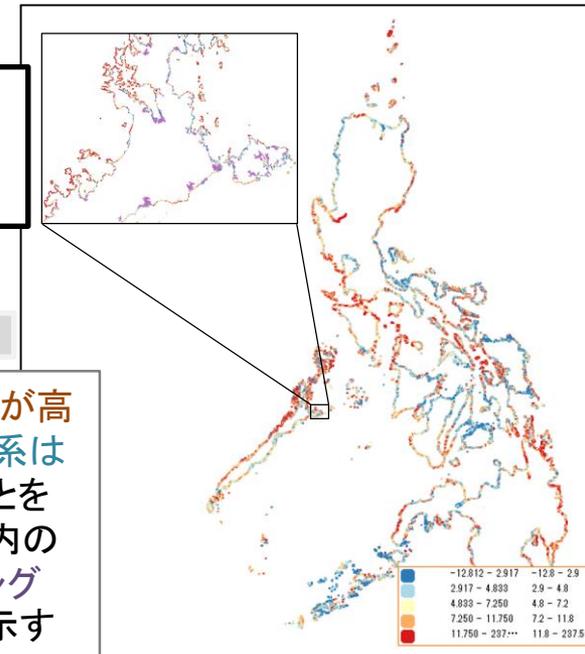
- 海岸近傍の標高, 平均傾斜角について類型図を作成
 - ✓ 高解像度DEMデータ (SRTM) と海岸線データ (GSHHG) を使用
- 生態分布と比較し, マングローブは平均傾斜角の緩い場所に分布する傾向がある



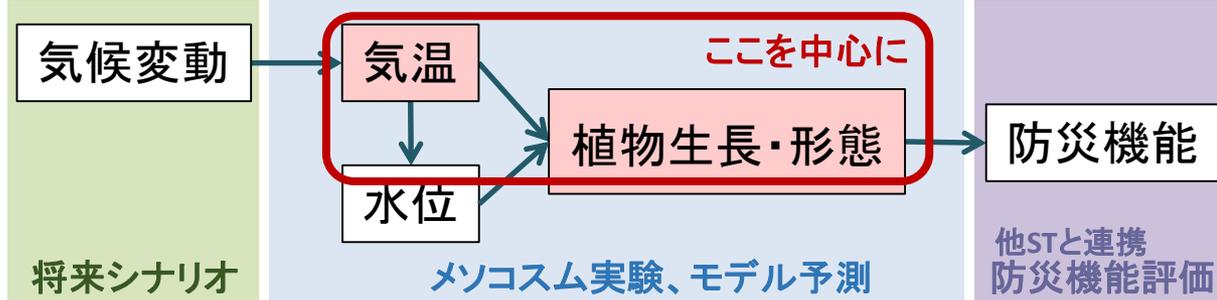
青: 本解析分類でマングローブと判定した地域 (2016-2018)
 緑: 国環研提供TroCEPによるマングローブ域 (1999-2003)
 黄: USGSによるマングローブ域

フィリピン全域に適用
 植生の把握と地形の類型化

沿岸地形の類型化

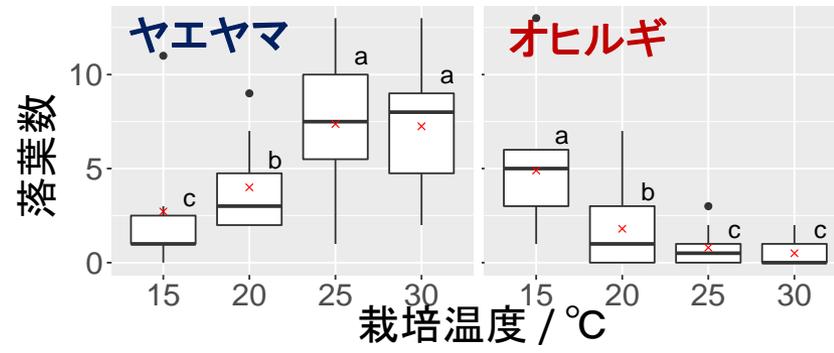
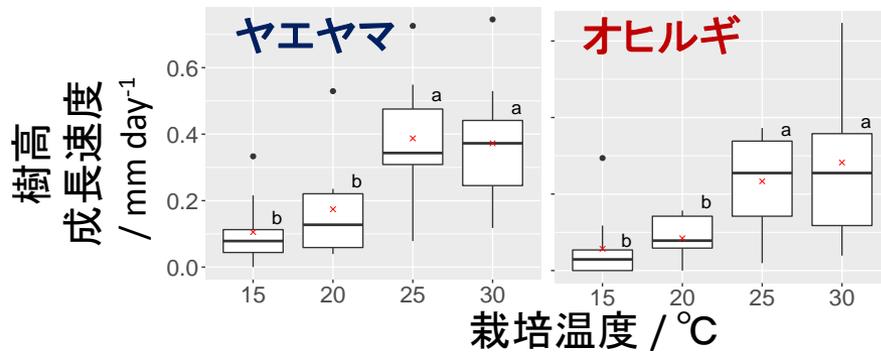
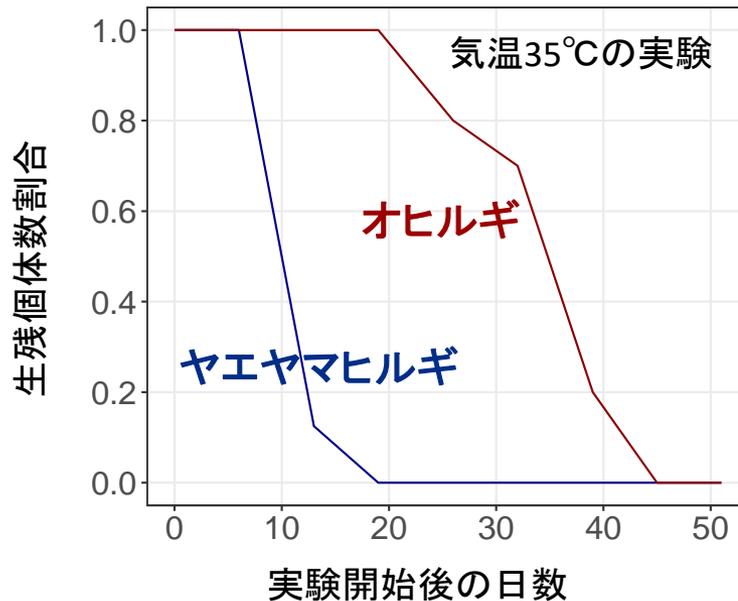


(成果) 要素技術 サブテーマ 3, 4 マングローブ特性把握



気候変動に伴う気温上昇がマングローブ植物の生育・形態に及ぼす影響を数値化

- 25℃までは気温上昇に伴って成長速度（樹高・幹径）が上昇する
- 30℃以上で成長速度が低下
 - ✓ 夜間の気温上昇の影響が大きい
- 35℃では枯死する
- 高温耐性に種差がある
 - ✓ オヒルギ > ヤエヤマヒルギ
- 気温上昇で、分枝パターン、葉数、根系成長が変化する



(成果) 要素技術 サブテーマ 3, 4 マングローブ特性把握



0年



3年



6年



10年

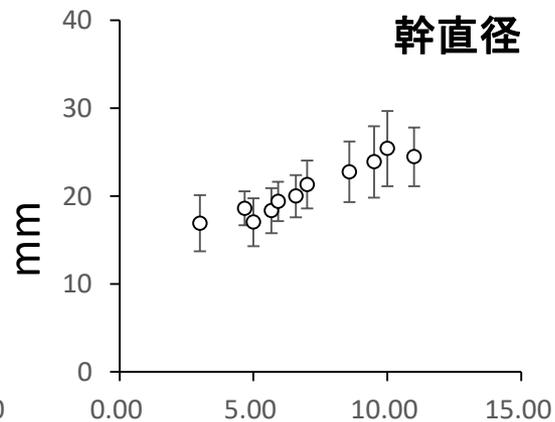
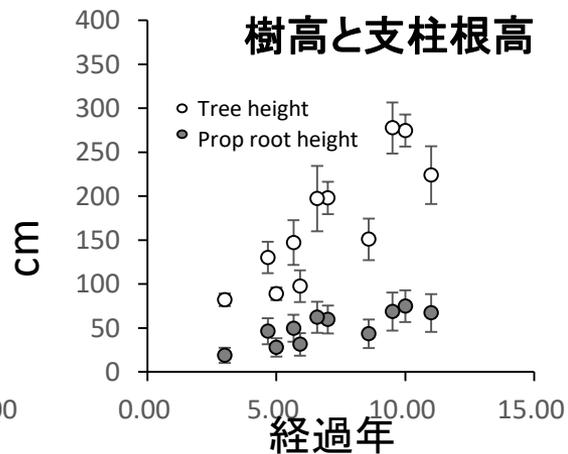
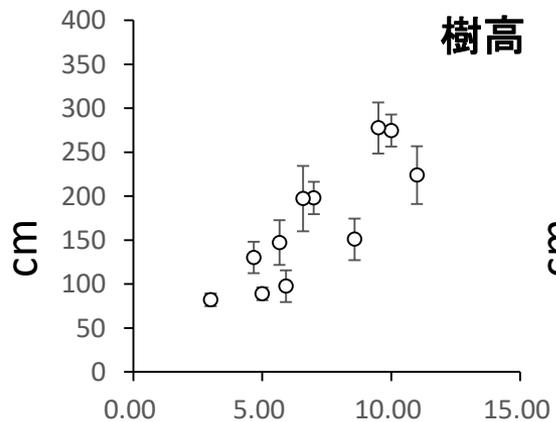
■ 適応策としてのマングローブ植林後12年間の生長・形態変化を数値化

● 樹高・幹直径・呼吸根形成の経時回帰モデルを取得

- ✓ 樹高生長速度は生育場所の環境（地盤高や養分）によって変動するが、幹直径生長はあまり影響を受けない

● 低窒素な干潟での養分獲得プロセスを解析

- ✓ 0-4年は雨水を窒素源とするが、5年目以降は窒素固定バクテリアとの相利共生による養分獲得となる



(成果) 要素技術

サブテーマ 3, 4: マングローブ特性把握

マングローブ特性の把握

物理特性・成長曲線の定式化 段波減衰効果の定量化

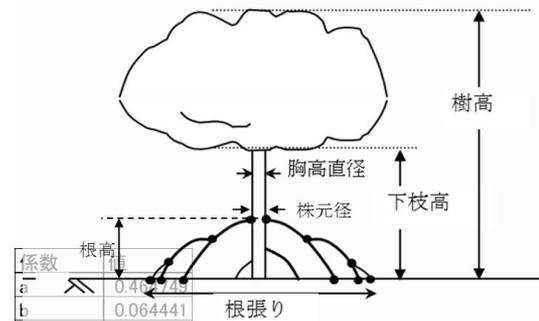
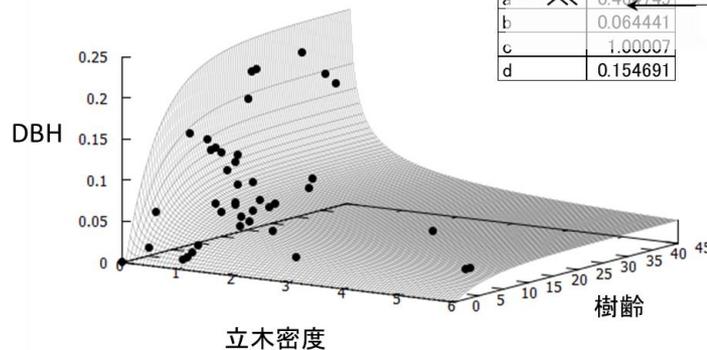
・研究手法

- ① ベトナム・西表島での毎木調査
- ② 3Dスキャナーによる計測
- ③ 衛星画像解析
- ④ 水槽実験・数値シミュレーション

・主な成果

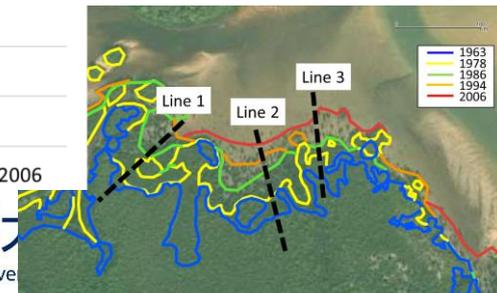
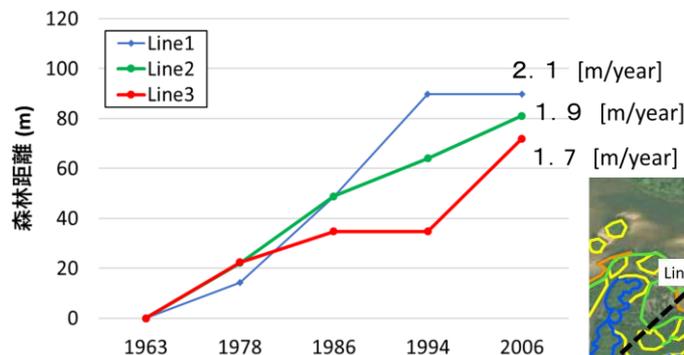
- ① 樹齢と樹径、密度の関係を定式化
- ② 支柱根構造の3Dデータ化と体積・投影面積の定式化
- ③ 森林の拡大速度の定量化
- ④ 段波の減衰効果の定量化

樹径の成長曲線



3Dデータ

森林の拡大速度



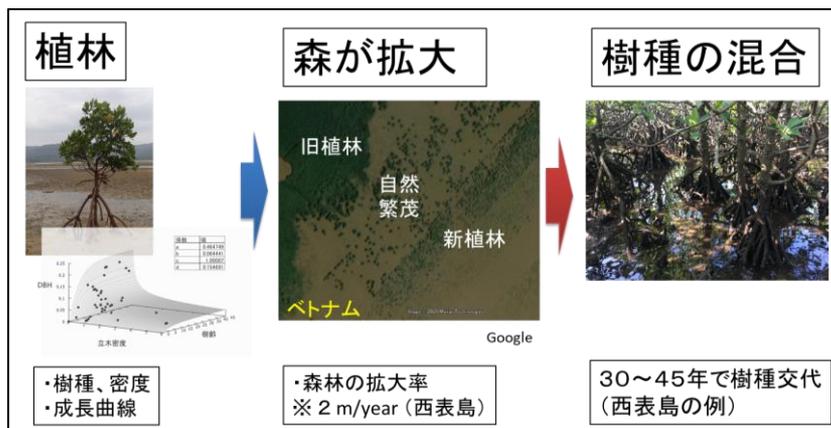
京都大学
Disaster Preve

(成果) 要素技術

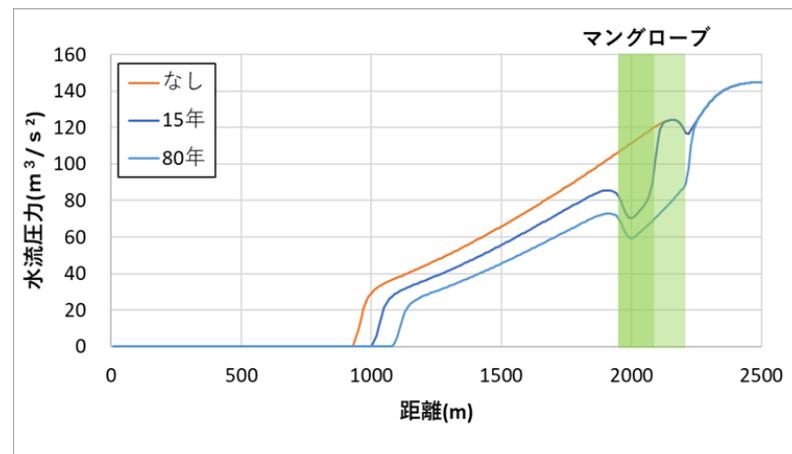
サブテーマ 3, 4: マングローブ特性把握

- ・植林シナリオ・将来予測のための基礎データ整備
- ・ECO-DRRに関する定量的評価技術の構築

基礎データの整備



成長に伴う減衰効果の経時変化



(成果) 要素技術+ : サブテーマ 4, 6

各インフラ及び背後地へ作用する波の影響を調査

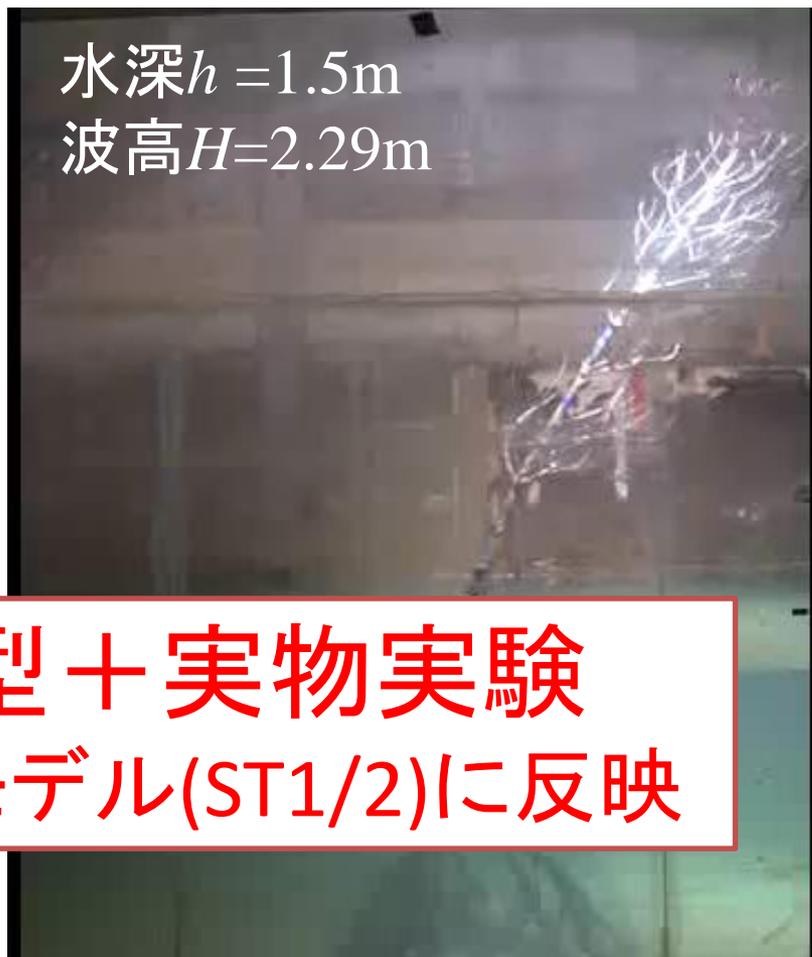
A. 模型実験 (2017)

- 実験条件 : 樹齢19年
 - 1/7スケール
- 計測項目
 - ✓ 抗力・慣性力



B. 実物実験*(2018)

水深 $h = 1.5\text{m}$
波高 $H = 2.29\text{m}$



世界初の3D模型+実物実験
詳細なデータは数値モデル(ST1/2)に反映

水理模型実験 正面

*実物実験: 琉球大・馬場名誉教授の協力: 環境省, 林野庁・沖縄県森林監理署, 竹富町教育委員会の許可を得た

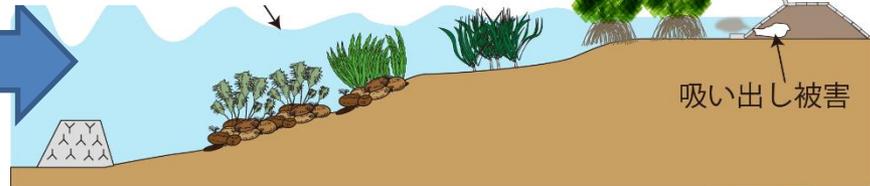
(計画) 社会実装技術

サブテーマ 5, 6

最適な適応策

コア技術
サブテーマ1

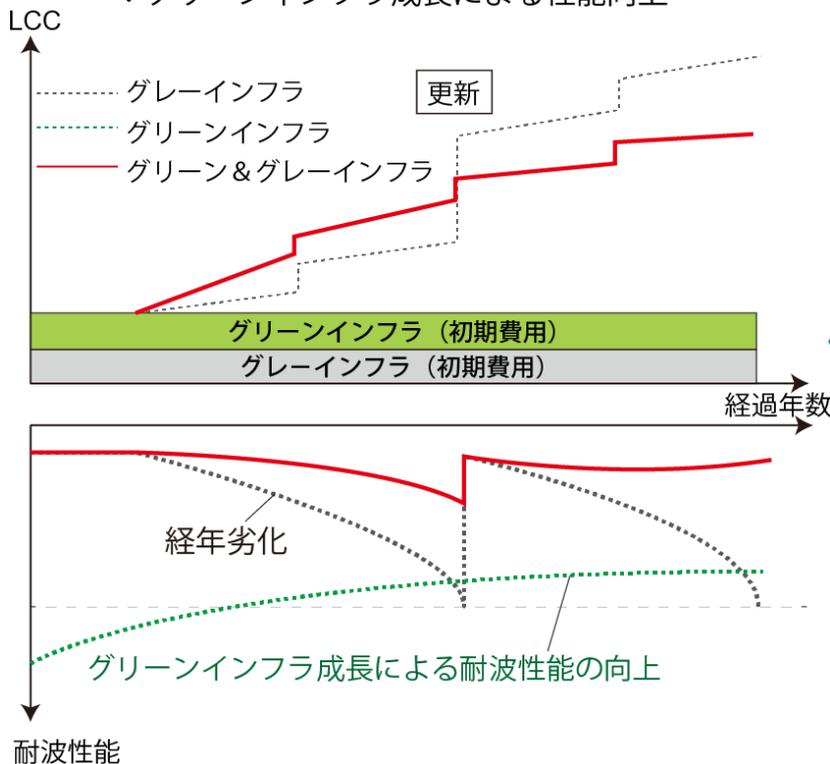
グリーン・グレーインフラの
複合作用による波の変形



【例】対象となるグレーインフラ】

1. マングローブ前面の離岸堤・潜堤
2. マングローブ背面の防潮堤(海岸堤防・護岸)

+ : グリーンインフラ成長のためのコスト
- : グリーンインフラ成長による性能向上



要素技術
サブ
テーマ
3, 4

1. グリーンインフラと グレーインフラの最適化

- 背後地に対する減災効果を最適とするレイアウトの標準化
- Eco-DRR/多重防護の最適化
✓ マングローブ林の植林間隔, 幅等
- 減災事例収集

2. ライフサイクルコスト

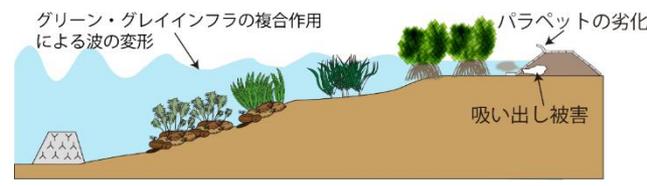
- 継続的管理・建設費用等の推定
- 適応効果とB/Cによる推計と組み合わせ、適応策の費用便益分析(CBA)を行う
- 代表的な国への展開



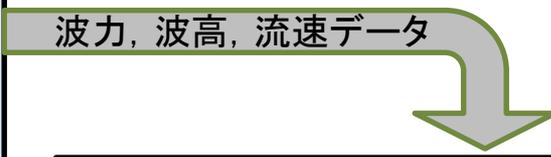
(成果)社会実装技術

サブテーマ5,6:最適な適応策

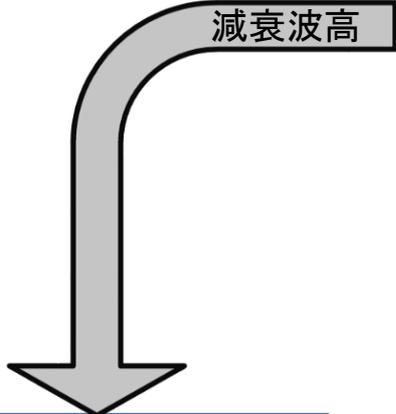
グリーンインフラの減災効果を「設計化」するため、
ST1 & 2 (波動)とST4 (波力)適用のための実験を実施・データを収集



- 中規模・大領域実験 (7分の1模型, 中型水路)
→ 3Dスキャン&3Dプリンターを用いた模型
- 大規模・極詳細実験 (実物, 大規模水路)
→ マングローブ実物使用



- ST1
位相解像型の波動モデル開発
- ST4
波力算定モデルの構築



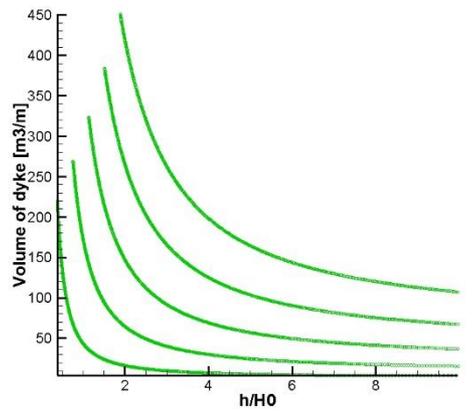
各インフラ及び背後地へ作用する波の影響を評価
⇒ 背後地の越波流量 (浸水量) の算定方法構築
⇒ グリーンインフラに対する堤体必要高の選定

- ST6
外力条件毎の最適な組み合わせ
施工箇所のLCC・断面選定



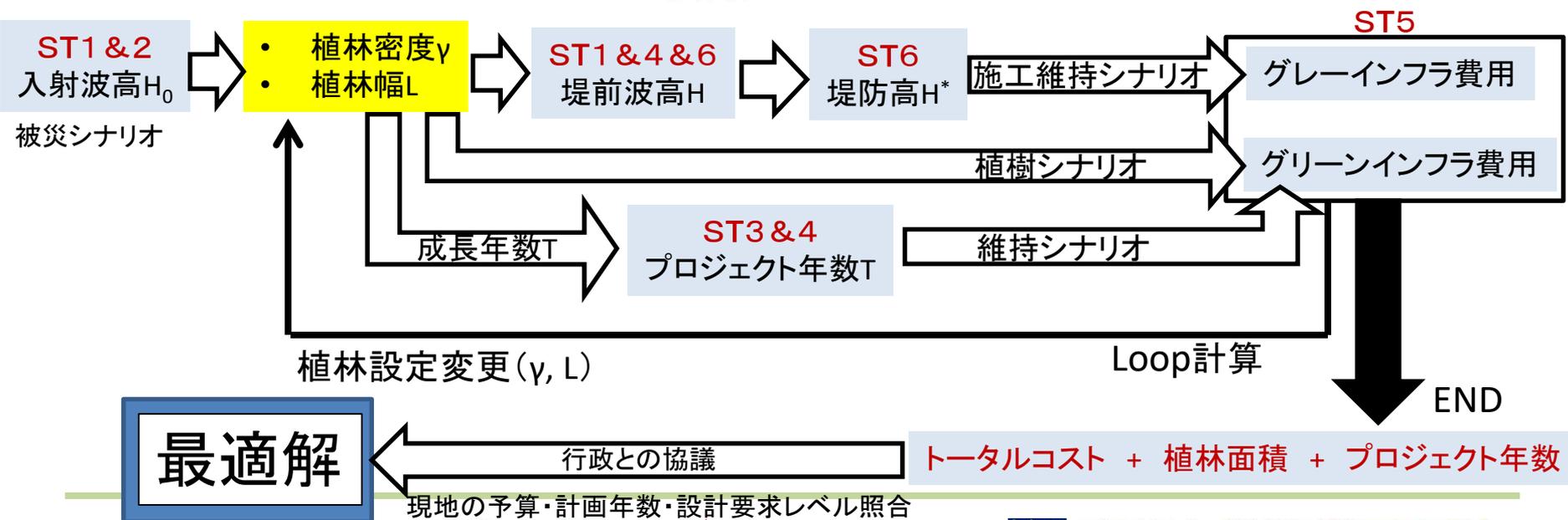
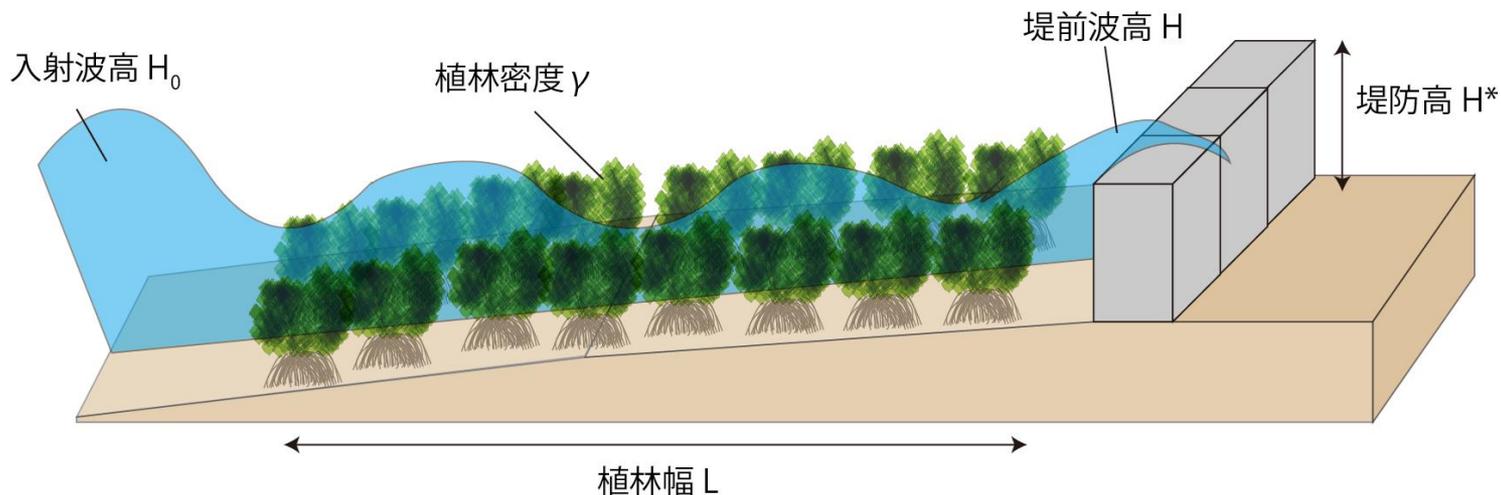
- ST6
費用便益

$$\frac{q}{\sqrt{gH_0^3}} = \begin{cases} 0.018 \left(\frac{R_{max}}{H_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left\{1 - \left(\frac{R_c}{H_0}\right) / \left(\frac{R_{max}}{H_0}\right)\right\}^{3.200} & \text{for } 0 \leq R_c \leq R_{max} \\ 0 & \text{for } R_{max} \leq R_c \end{cases}$$



堤防高と予想越波流量との関係

LCCのための最適な設計断面(グリーン&グレイインフラ)の選定アルゴリズムを作成



(成果) 社会実装技術

サブテーマ 5, 6 : 最適な適応策

■ ベースシナリオの作成と費用の算出

- 想定災害 : 海面上昇のみ(RCP8.5)
- 経済想定 : SSP1-3

■ 想定条件① : グリーンインフラ

- 5年毎に植林
- 海面上昇分は「埋立て+植林」
- 伐採量は「植林」

■ 想定条件② : グレイインフラ

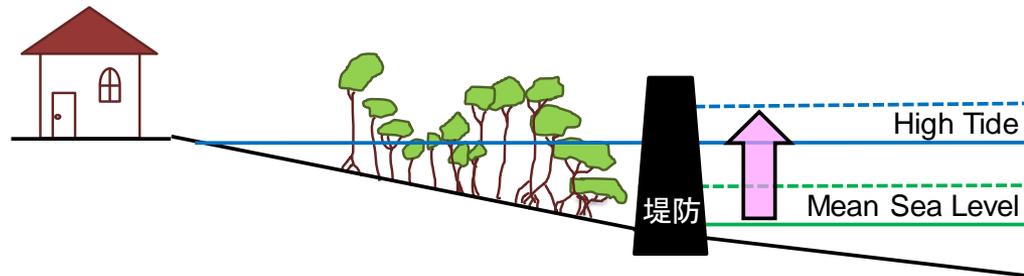
- 標準断面を調査
- 高さ・耐用年数を考慮した「堤防設置費用」「メンテナンス費用」

■ 被害額・費用の推定

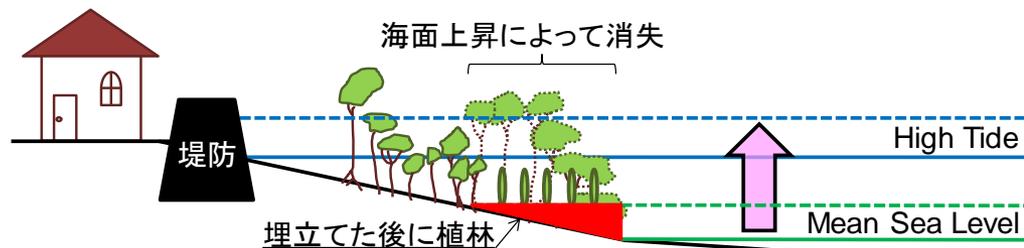
- 費用便益比

想定適応策例

Case 1: 堤防のみ



Case 2: 堤防とマングローブの混合

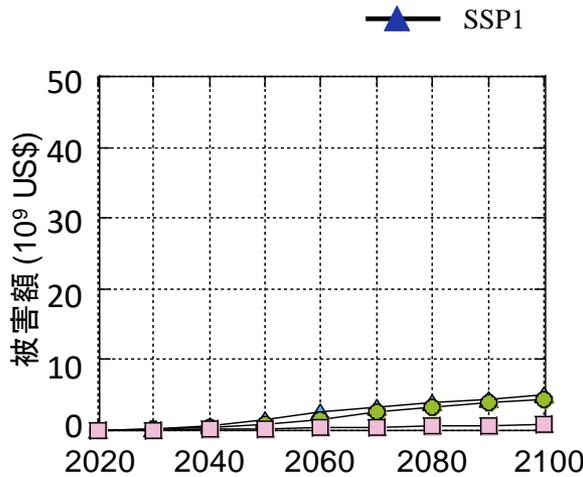


(成果) 社会実装技術

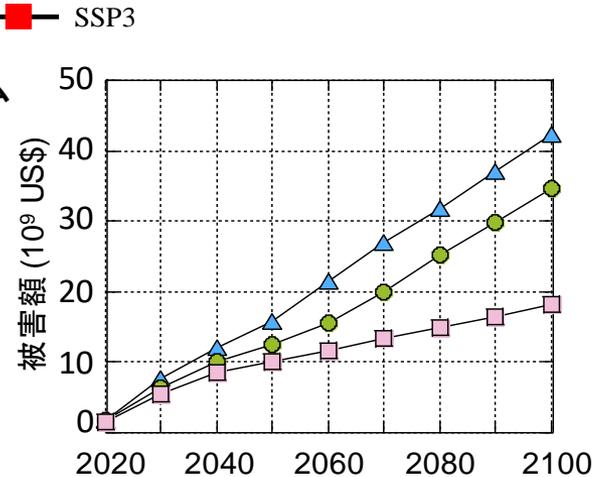
サブテーマ 5, 6 : 最適な適応策

被害額

(1) フィリピン

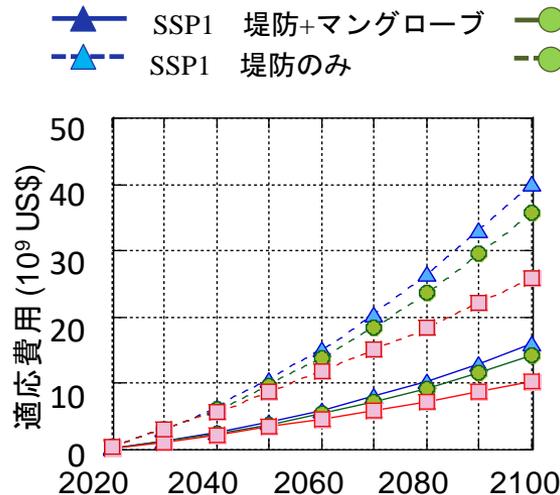


(2) ベトナム

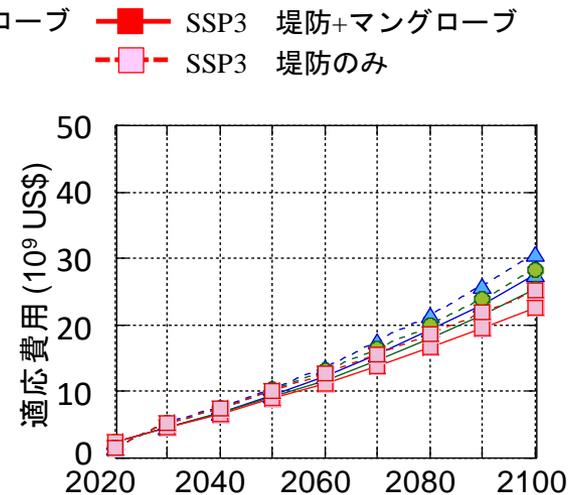


適応費用

(1) フィリピン



(2) ベトナム



グリーンインフラ導入はコストダウンに繋がる
 国によりB/Cは様々(ハザードレベル・経済レベル)



国民との対話

■ 2017

- 8/10 ときめきひらめきサイエンス（茨城大）
- 11/7 茨城大学一般公開講座、サステナビリティ・フォーラム2017
- 2/24 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」

■ 2018

- 9/22 京都大学アカデミックデイ2018
- 12/9 マングローブ学会・一般向けシンポジウム（協賛）

■ 2019

- 11/23 ニッセイ財団助成研究ワークショップ（協賛）
 - ✓ 「自然と歴史を活かした震災復興—持続可能性とレジリエンスを高める景観再生—」

■ その他アウトリーチ

- 2017/7 NEC記者発表
- 2018/7 毎日新聞朝刊
- 2019/1,2 日経コンストラクション

港湾空港技術研究所での実物実験の様子



おわり

参考資料



NEC



京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

政策・科学的・技術的意義

■ 環境政策への影響

- 気候変動に伴う沿岸災害に対する
グリーンインフラの減災効果
(ECO-DRR) の定量化
- 太平洋・アジアへの国際展開
- 緩和策とのシナジー

■ 気候変動適応策技術開発

- 最新の科学的知見に基づく温暖化
影響→擬似温暖化実験
- 台風・高潮・高波の一体的な
シミュレーションモデル化
- スーパーコンピュータによる
シミュレーションの高速実行と
長期評価

■ マングローブ防災効果の定量化

- 高精度マングローブ模型・実物
大モデルを用いた水槽実験を組
合せて、モデル係数を推定
- マングローブの経年変化、温暖
化が及ぼすマングローブ植生や
生態系への影響を合わせて評価

■ 最適化・適応策コスト評価

- ハザード強度に応じたグリーン
・グレーインフラの最適化
- グリーン・グレーインフラにお
けるライフサイクルコストの推
定

研究体制

コア技術: 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 (京大)	大気・海洋・波浪結合モデルによる台風時の高潮・高波評価モデルの開発	竹見 *金沢大: 二宮
	温暖化を考慮したフィリピン沿岸の高潮・高波長期評価	竹見, 志村, *NEC
	マングローブ低減効果を考慮した沿岸部高潮・波浪シミュレーションモデルの開発	森, Chang
サブテーマ2 (NEC)	HPC技術適用によるシミュレーションモデルの高度化	撫佐, 後藤, 坂倉, 平

要素技術: マングローブ防災効果の定量化

サブテーマ3 (国環研)	現地調査に基づくマングローブの物性評価・植生分布の評価	井上
	マングローブに及ぼす温暖化の影響	井上・山野

サブテーマ4 (東北学院大学)	3Dスキャナー・プリンターによるマングローブのモデリング	柳澤
	水理実験によるマングローブ波浪低減効果の把握	柳澤, *港空研・鈴木

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 (茨城大)	グリーンインフラによる減災効果+LCC	横木・田村
サブテーマ6 (港空研)	グレーインフラによる減災効果+LCC	鶴田
	外力条件ごとの最適な組み合わせ	鈴木

論文・発表一覧

■ サブテーマ 1

- (論文) 土木学会論文集 B2 (海岸工学)* 2篇
- (発表) AOGS annual meeting

■ サブテーマ 2

- (発表) Re-Emergence of Vector Architectures Workshop (IEEE Cluster 2018)

■ サブテーマ 3

- (書籍) 図説日本の湿地, Policy and Implementation
- (解説) 科学, 自然保護

- (発表) International Conference on Sustainable Mangrove Ecosystems, JpGU-AGU Joint Meeting, 日本生態学会第64回大会

■ サブテーマ 4

- (発表) JpGU-AGU Joint Meeting 2017

■ サブテーマ 5

- (論文) International Journal of Global Warming, 土木学会論文集G (環境)
- (Proc.) CLIVAR Exchanges2018

■ サブテーマ 6

- (発表) AOGS annual meeting

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 (沿岸侵食に対するマングローブ植林技術導入による緩和)
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. 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
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)
5. 協力案件名 : フィリピンにおけるマングローブの植林事業に係る調査
カウンターパート : Conservation International Philippines Foundation Inc.(Mr.Glen De Castro、Development Director、Ms.Audrey Palomar、Research Assistant)
(フィリピン)



