

東南アジアでのマングローブ植林技術導入による温暖化対策評価

酒井 裕司

工学院大学

概要

マングローブ、塩性湿地、海草藻場などのブルーカーボン(BC)生態系の保全と修復は、生物多様性、気候変動における緩和と適応、そして自然を基盤とした解決策(NbS)としても注目されている。そのため、ブルーカーボン生態系における炭素の貯留量やフラックスなどに関する研究報告例は、最近増加傾向にあり、なかでもマングローブ林は炭素貯留量が最も高く、生産性の高い生態系で、漁業生産、沿岸保護、洪水被害のリスク軽減など、幅広い生態系サービスを提供可能である。マングローブの植生域における堆積物中の炭素貯留量は生態系全体の約 70%を占め、その規模や量は、地域的特性や沿岸域の生育環境などにより決定される。そして、本研究で対象とするインドネシアは、世界最大のマングローブ林(約 336 万 ha)を有し、世界のマングローブ林面積の 20~25%に相当する。さらに最近、沿岸生態系の保全と気候変動の緩和などを目的として、マングローブ林の再生を国家レベルで大規模に展開しているが、成功していない事例も多く存在している。

そこで本研究では、インドネシア南部に位置する東 Nusa Tenggara 州スンバ島のマングローブ植林試験区において、生態系炭素貯留量を評価した。研究対象としたマングローブ植林地は、スンバ島北東部の Padadita (Pd) 地区と Watumbaka (WT) 地区の 2 地域にある。Pd 地区では、マングローブ植林地の未生育地域と生育地域の植生と土壌の物理性及び化学性(pH, EC(電気伝導率), 含水率, 乾燥密度など)を、WT 地区では、植林後 21 年の生育良好なマングローブ植生試験区と新規植林試験区で、同様に調査及び測定後にデータを解析した。

その結果、植林後 21 年の WT 地区での生態系炭素貯留量は $86 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ と算出され、世界平均値を上回る貯留量であることを確認出来た。さらに、その植林地周辺での新規植林試験では、初期成長と土壌炭素貯留量において良好な結果を示すことが出来た。さらに、土壌炭素貯留量と電気伝導率、水分含有量などとの高い相関性が確認されたことから、土壌酸性化と含水率向上による炭素貯留の促進が示された。以上より、本研究でのマングローブ植林による炭素貯留量の改善の結果から、本技術が自然を基盤とした解決策としてブルーカーボン生態系修復に貢献可能であると考えられる。

1. 研究目的

温暖化対策の国際的枠組みであるパリ協定後、世界各国の温暖化対策が本格化するなか、気候変動の緩和策やネガティブエミッション技術(NETs)の開発及び評価が進行してきている。そのような背景の中、マングローブ、塩性湿地、海草藻場などのブルーカーボン(BC)生態系の保全と修復は、生物多様性、気候変動における緩和と適応、そして人類と地球の豊かさを支える更なる生態系の機能をサポートする自然を基盤とした解決策

(NbS)としても注目されている。そのため、ブルーカーボン生態系における炭素貯留量と炭素フラックスに関する研究事例は、最近、飛躍的に増加している。そして、さらにカーボンニュートラル実現に向けた具体的な取り組みが世界中で加速化しており、各国にて様々な技術やそれらの導入方法、さらに政策や制度などにおいて検討が進められている。上述のように、2015年 COP21でのパリ協定採択後、大気中のCO₂除去及び隔離技術(NETs, CDR など)が、各国において導入及び開発が

急速に進行してきた。NETs には、植林／再植林、土壌炭素貯留、バイオ炭、BECCS、DACCS、風化促進や鉱物化、海洋肥沃化などが挙げられ¹⁾、なかでも、植林／再植林、森林管理、農地への土壌炭素貯留、沿岸ブルーカーボンなどの生態系を活用した土地利用に基づく技術は、他の技術(BECCS、DAC、鉱物化)と比較して、低コストで広範囲での実施が可能であり注目されている²⁾。

そして、これらの生態系を活用した技術は、陸域及び沿岸域などの自然生態系での炭素吸収量、隔離量及び貯蔵量を保護及び増加させることに寄与している。このような対応策は、NbS として、「社会課題に効果的かつ順応的に対処し、人間の幸福及び生物多様性による恩恵を同時にもたらす、自然のあるいは改変された生態系の保護、持続可能な管理、回復のための行動」のように定義されている³⁾。すなわち、NbS は、社会的課題に対する自然を基盤とした解決策であり、環境、社会、経済における利点を提供しつつ、生物多様性と人間の生活への好循環をもたらすものということもできる。そして、そのような NbS では、生態系修復(回復)に関するアプローチをはじめ、気候変動への適応と緩和に関する生態系を基盤としたアプローチや、防災・減災、さらに沿岸や水資源の管理などへのアプローチなどがある。そのため、緩和と適応の両側面において、気候変動対策として活用が期待されるアプローチであるとともに、生物多様性の保全にも寄与するなど、地域に適合した導入や活用により複数の課題を同時に解決できる可能性などを有している。

このような生態系のなかでも、マングローブ林、塩性湿地、海草藻場などのブルーカーボン生態系は、高い炭素貯留ポテンシャルを有することによる気候変動対策への貢献のみならず、災害・防災などへの寄与、さらに、社会的課題に対する自然を基盤とした解決策として、環境、社会、経済において、生物多様性と人間の生活との共生においても重要な貢献をもたらす。しかし、それらの貴重な生態系の生育面積が年々減少しており、ブルーカーボン生態系における保全かつ修復が喫緊の課題である。

それらブルーカーボン生態系としてのマングローブ林、塩性湿地、海草藻場は、海洋面積のわずか0.5%以下の生育面積にもかかわらず、それらの生態系におけ

る年間貯留量は、海洋の堆積物中に毎年貯留される全炭素量の 50%から最大 71%にも達すると報告されている。また、これら 3 つの生態系に存在する植物の総現存量は、陸上植物の僅か 0.05%に過ぎないが、年間の炭素貯蔵量は地球上のすべての陸上植物が貯蔵する炭素量に匹敵するとも報告されている⁴⁾。そのため、これらの生態系は、地球上でも非常に効果的な炭素吸収源(ブルーカーボン・シンク)と位置付けられている。

なかでも、本研究では、熱帯・亜熱帯の海水の出入りする沿岸域や河口域に広がる塩生樹木群が形成する生態系の総称で、塩性土壌に強い耐性を持ち生物多様でしかも生物生産性の高い生態系であるマングローブに着目する。上述のように、ブルーカーボン生態系の中でも最大の炭素貯留量を有するマングローブの植林・再植林は、温暖化対策技術として有効である⁵⁾。世界のマングローブ林の約 20-25%⁶⁾と最大の植生面積を有するインドネシアでは約 42%が深刻な被害を受けているとの報告もあり⁷⁾、さらに、政策的にもマングローブ林回復の取り組みが積極的に進められているが、土地の特性、樹種の選択、管理の維持が考慮されていない等の要因から成果が発揮されていない事例も多い⁸⁾。そして、精確な炭素貯留量データが十分に得られていない状況でもある。

そこで、酒井らは、2023 年より、インドネシア南部のマングローブ植林・再植林地帯を対象として、マングローブ植林後の生育・未生育地域を対象として、植生、土壌特性及び炭素貯留量について研究成果を報告してきた⁹⁾。本報告では、上記対象地域における 2024 年度の調査結果を踏まえたマングローブ植林後の生育・未生育地域における植生及び土壌特性から生育要因を評価する。さらに、新規植林地における植林後の調査、及び、新規植林試験区での良好な生育地域での生態系炭素貯留量を現地調査結果から算出する。そして、他の東南アジア地域としてマングローブ植林・再植林で成功実績のあるタイ南部における関連データ¹⁰⁾との比較、評価を行い、生態系炭素貯留量の視点から、本対象植林試験区での温暖化対策技術としての妥当性を評価することを目的とする。

2. 研究方法

2.1 研究対象地

本研究におけるマングローブ植林の対象試験区は、インドネシア東ヌサ・トゥンガラ州スンバ島の北東部にある (Fig. 1)。東ヌサ・トゥンガラ州では、約 330 万 ha が乾燥気候地域に分類され、さらに約 100 万 ha が年間降水量 1000 mm 未満の非常に乾燥した地域または半乾燥地域に分類される。スンバ島は、インドネシアの小スンダ列島に属し、熱帯気候で1年中暑く、12月から3月が雨季、6月から10月が乾季であるため、降水量はそれほど多くなく、特に北部海岸沿いや低地では年間 1000 mm を下回り、植林対象区のある Waingapu での降水量は、約 800 mm である。

本研究で対象としたマングローブ植林試験区は、Padadita (以下、Pd と記載) 地区と Watumbaka (以下、WT と記載) 地区にある (Fig. 1)。Pd 地区では、植林後 3 年 (Pd 3)、4 年 (Pd 4) での未生育地域と、植林後 5 年 (Pd 5)、6 年 (Pd 6)、10 年 (Pd 10) での生育地域、さらに、WT 地区では、植林後 20 年 (WT 20)、21 年 (WT 21) での生育良好地域と 2023 年に新規植林実施した 3 つの試験区 (WT1-1, WT1-2, WT1-3) を対象に評価した (Table 1)。なお、すべての対象試験区において、*Rizophora* 系の樹種が植林されており、対象試験区では *Rizophora stylosa* が植林・再植林されている。

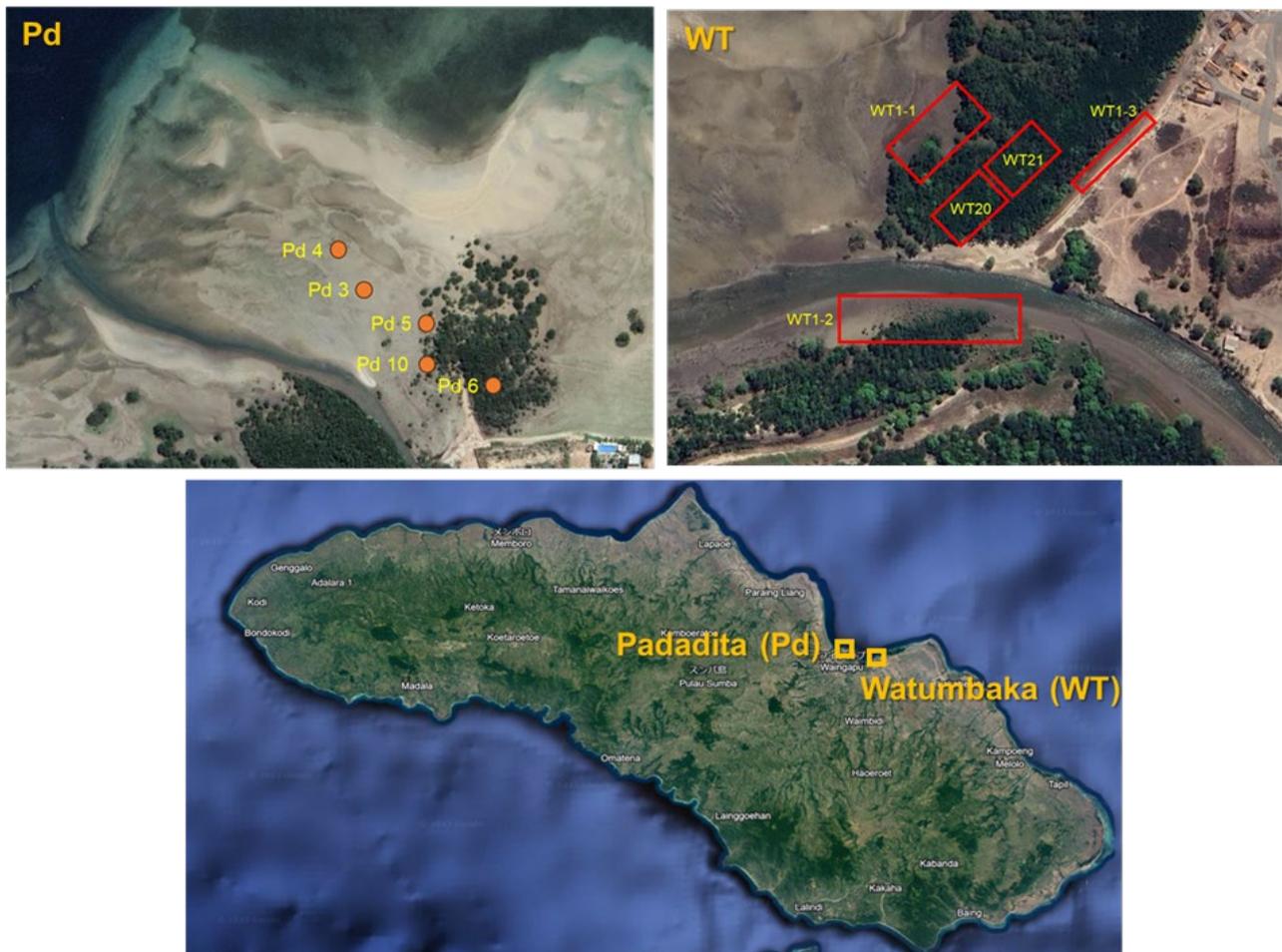


Fig. 1 インドネシア南部スンバ島におけるマングローブ植林試験区 (Padadita (Pd), Watumbaka (WT))

Table 1 マングローブ植林試験区(Padadita (Pd), Watumbaka (WT))における概要

地域名	試験区名	植林年	経過年数 [yr]	樹間 [m]	生育状況
Padadita (Pd)	Pd 3	2020	3	3.0	×
	Pd 4	2019	4	3.0	×
	Pd 5	2018	5	3.0	○
	Pd 6	2017	6	3.0	○
	Pd 10	2013	10	3.0	○
Watumbaka (WT)	WT 1-1	2023	0.67	2.0	○
	WT 1-2	2023	0.67	2.0	○
	WT 1-3	2023	0.5	2.0	○
	WT 20	2003	20	2.0	◎
	WT 21	2003	21	2.0	◎

2. 2 調査及び研究方法

2. 2. 1 調査方法

各マングローブ植林試験区において、植生調査及び土壌特性評価のための土壌サンプリングを実施した。まず、植林試験区での生育状況を調査するため、単位面積当たりの生育本数と試験区内における平均的な生育樹木の樹高、胸高直径 (DBH) を測定した ($n \geq 20$)。さらに、土壌サンプリングにおいては、各試験区にて平均的なマングローブ生長を示している樹木を選択し、幹から約 50 cm の地点での周囲 3~5 地点にて行った ($n = 3 \sim 5$)。また、土壌採取では、検土杖を使用して土壌深さ方向に、地表面から 1 m までの各 10 cm 毎に採取を行い、ジップ付きの保存袋に保存した。

2. 2. 2 分析方法

各植林試験区にて採取した土壌の重量、土壌水分量、乾燥密度、含水比 (率) を測定後、土壌溶液 (1:5 (重量比)) を作製し、pH(H₂O), pH(KCl), EC を pH・EC 電極 (F-55, Horiba) で、Na イオン濃度は原子吸光分光光度計 (AA-7000, Shimadzu) でそれぞれ測定した。さらに、採取土壌の土壌有機物 (SOM) 量を強熱減量 (4 hr, 550°C) にて測定後、土壌炭素量に換算した¹¹⁾。また、現地調査にて測定した試験区ごとの単位面積当たりの生育本数とアロメリー式¹²⁾による地上部 (C_{AGB})、地下部バイオマス中の炭素貯留量 (C_{BGB}) から、バイオマス中の炭素貯留量を算出し、さらに、それらと土壌中炭素貯留量 (C_{soil}) を合計した値を生態系炭素貯留量 (C_T) として算出した。

3. 研究結果

3. 1 マングローブ植林生育・未生育地域での植生及び土壌特性の比較結果

マングローブ植林試験区として、Padadita (Pd) 地区の試験区を対象として検討した。植林後 3 年 (Pd 3), 4 年 (Pd 4) での未生育地域と、植林後 5 年 (Pd 5), 6 年 (Pd 6), 10 年 (Pd 10) での生育地域を対象として、土壌特性を土壌深さ (0~1 m) にて深さ 10 cm 毎に測定後、植林試験区ごとに比較した。具体的には、土壌密度、土壌水分、土壌 pH, EC, Na 濃度, SOM を測定した。以下にて、土壌乾燥密度、含水比 (率), pH, EC についての未生育、生育地域における測定値の違いや特徴を記載する。

土壌乾燥密度の深度別の経年変化では、未生育地点と生育地点 (Pd 5, Pd 6) に殆ど差は見られず、Pd 10 地点の密度が最も低かった。土壌乾燥密度はどの深さにおいても、0.73~1.2 [g/cm³] 程度であった (Fig. 2)。

含水比の深度別経年変化では、未生育地点より生育地点の方が高い値を取り、未生育地点は 25.7~43.0 [%], 生育地点では 29.0~57.4 [%] の範囲をとった。なかでも、Pd 6 地点が最も高い値を取り、50.1~57.4 [%] を示した。全体的に、植林地の位置が内陸に進むにつれて含水比が増加する傾向が見られ、また、全体的に深度における大幅な変化は確認されなかった。そして、含水率においても、深度別の経年変化では、未生育地点より生育地点の方で高い値を取った。未生育地点では 20.4~29.2 [%], 生育地点では 24.8~34.8 [%] であり、含水比同様、Pd 6 地点で最も高い値を示し、32.2~35.4 [%] を示した。傾向についても、含水比同様、内陸に進むにつれて含有率の上

昇が確認され、全体的に深度における大幅な変化は確認されなかった。

次に、ECの深度別の経年変化では、未生育地点よりも生育地点において高い値を取った。未生育地点では2.6~4.6 [dS/m]、生育地点では3.4~7.7 [dS/m]の範囲を取り、Pd 6 で最も高い値(7.1~7.7 [dS/m])を示した。そして、全体的に深度における大幅な変化は確認されなかった (Fig. 3)。

さらに、pH(KCl)の深度別の経年変化では、未生育地点よりも生育地点で低い値を取った。未生育地点では8.0~8.4 [-]、生育地点では7.7~8.1 [-]の範囲の値を取り、Pd 6 にて最も低い値(7.7-7.8 [-])を示した。そして、全体的に深度の増加に伴いやや低下する傾向が得られた (Fig. 4)。pH(H₂O)の方も同様、深度別の経年変化では、未生育地点よりも生育地点において低い値を取った。未生育地点では8.1-8.4 [-]、生育地点では7.9-8.4 [-]で、Pd 6 地点で最も低い範囲での値(7.9-8.4 [-])を取った。傾向も同様で、深度の増加に伴う若干の低下傾向が確認された。そして、pH(KCl)の値がpH(H₂O)の値よりも全体的に低い値を取ったことから潜在的な酸性を有することが示された。

以上より、植林対象試験区(Pd)地点での未生育地点(Pd 3, 4)と生育地点(Pd 5, 6, 7)を比較すると、未生育地点のpHが高く、EC値が低い結果となった。このことから、未生育地点の未成育要因が塩害(高濃度の塩分)ではないことが確認された。*Rhizophora stylosa*の生息地の塩分濃度範囲は約6.53~22.1 [dS/m]、pHは約5.11~7.87 [-]であるという報告¹³⁾から、塩分濃度、pHという土壤環境において、未成育地点での生育は可能であると考えられる。さらに、生育環境については、*Rhizophora*種は波浪に弱く、沖側では10[%]しか生存しなかったという報告もあり、波浪を避けて濁度の高い潮流がある川や小川沿い等で外部からの物理的なインパクトからも保護された場所の方が植林に適するとされており¹⁴⁾、本対象試験区でも沖側より陸側のマングローブ生育状態が良いことから、土壤特性(pH, EC他)以外の外的因子である波浪による影響が大きいと考えられた。

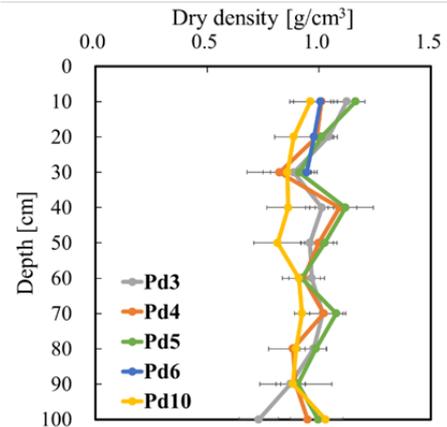


Fig. 2 Pd 植林試験区での土壤乾燥密度変化

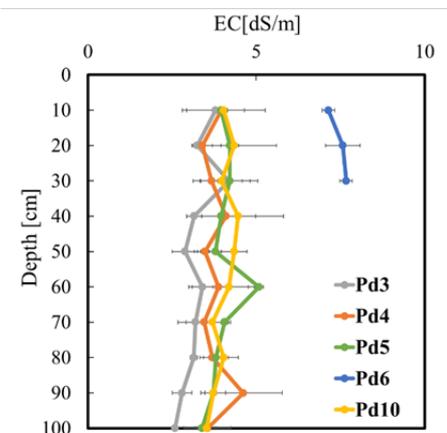


Fig. 3 Pd 植林試験区での土壤 EC 変化

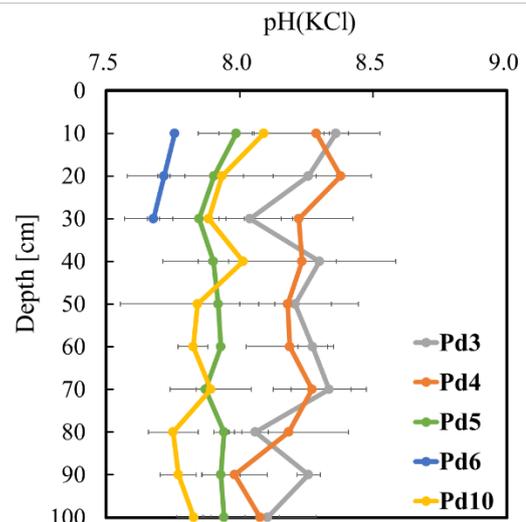


Fig. 4 Pd 植林試験区での土壤 pH 変化

3. 2 マングローブ植生良好地域及び新規植林地に

おける土壌特性及び炭素貯留評価

3. 2. 1 マングローブ植生良好地域における土壌特性 結果

マングローブ植林後の生育良好な試験区として、Watumbaka(WT)地区の植林後 20 年, 21 年の試験区 (WT 20, WT 21)を対象として生育状況と土壌特性を検討した。なお, WT 20と WT 21 では植林後の経過年数が 1 年経過していることと, 本年度調査実施した WT 21 は, WT 20 よりも生育が良好な少し内陸側に位置する地点を調査した。植生密度も, それぞれ 6700 本/ha (WT 20), 7300 本/ha (WT 21)であった。

最初に, 生育良好試験区(WT 20, WT 21)における土壌特性の結果を記載する。まず, 土壌乾燥密度では WT 20 の方 WT 21 よりも低い値を取った。WT 20, WT 21 ともに深度 90~100 cm にて増加する同様の傾向が得られた (Fig. 5)。含水比では, すべての深さにおいて WT 21 の方が, WT 20 よりも高い値を取り, WT 21 の方では, 表層から深さ 50 cm 付近までは非常に高い値を示し, 深さ 40 cm 以下になるにつれて減少する傾向が見られた (Fig. 5)。含有率でも含水比と同様な傾向が確認出来た。そして, EC では WT 21 の方が, 殆どの深さにて WT 20 よりも高い値を取った。WT 21 では殆どの深さで, 7~8 [dS/m]の範囲を取った (Fig. 6)。次に, pH においては, pH(H₂O)では, WT 20, WT 21 の両方では 7.4~8.7 [-]の範囲であったが, WT 21 の方は深さ毎の大きな差は無く, 7.5 よりもやや高い付近を取り, WT 20 よりもすべての深さで大幅に低い値を取った。そして, pH(KCl)では, 7.3~8.2 [-]の範囲であり, pH(H₂O)と同様, WT 21 の方が WT 20 よりもすべての深さで大幅に低い値を取り, 約 7.4 付近ではほぼ全ての深さで一定であった (Fig. 7)。pH(KCl)の方が, pH(H₂O)よりも全体的に低い値を取ったことから潜在的な酸性が示され, このことは, マングローブの成長による土壌の酸性化を示している。さらに, 生育良好植林地域の Na イオン濃度では, より生育が良好な地域 (WT 21) の方が WT 20 よりも高い値を取ることが確認された。

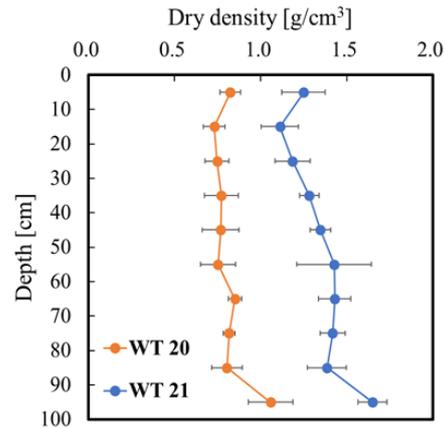


Fig. 5 WT 植林試験区での土壌乾燥密度比較

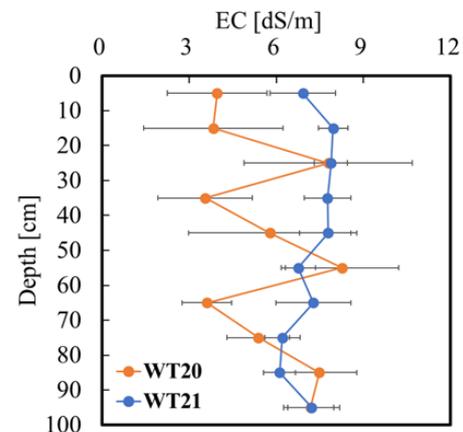


Fig. 6 WT 植林試験区での土壌 EC 比較

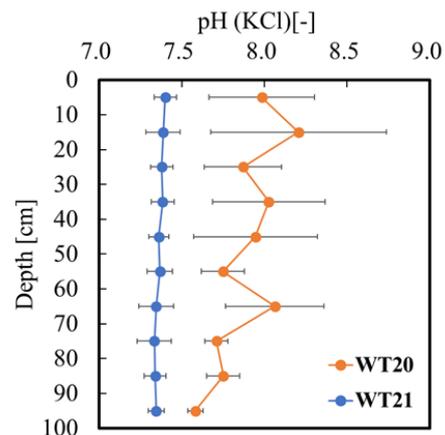


Fig. 7 WT 植林試験区での土壌 pH 比較

3. 2. 2 マングローブ新規植林地帯における生育及び 土壌特性結果

WT 地区への今後のマングローブ新規植林の可能性を検討するために、上記の植林での良好な生育試験区 (WT 20, WT 21) 近辺に、新規植林試験区を 3 ヶ所設置し、植林試験区内にて土壌採取した地点 (WT 1-1, 1-2, 1-3) においても植林初期の生育状況と土壌特性を検討した。

まず、新規植林地帯における深度別の土壌乾燥密度では、WT 1-1 以外は、表層部から深層部まで値にそれほど大きな差は確認されなかったが、WT 1-1 では変位が大きく、他地域よりも高かった (Fig. 8)。そして、含水比では、WT 1-1 が最も低い値を示し、WT 1-2 にて高い値が確認された。含水比は 27.8~97.0[%]と幅広く分布していることが確認され、表層部よりも深層部のほうが若干高い値が確認された。そして、含水率も同様の傾向で、WT 1-1 が最も低い値を取り、WT 1-2 において高い値が確認された。含水率は 21.7~48.6[%]の範囲であり、表層部よりも深層部のほうが若干高い値が確認された。

次に、EC では、WT 1-3 で 3.9~8.7 [dS/m]の範囲に分布し、WT 1-3 で全ての深さにて高い値を示し、深層部 80 cm 以深では高い値を取るような傾向であった (Fig. 9)。

次に、新規植林地帯の pH(H₂O)では、8.0~8.5 [-]の範囲に値を取り、ほぼ全ての深さで WT 1-2 が高い値を取った。pH(KCl)では、7.8~8.0 [-]の範囲に値を取り、若干植林開始時期の遅い試験区の方が表層から 30 cm 付近にて高い値を取るような傾向であった (Fig. 10)。そして、Na イオン濃度でも、若干植林開始時期の遅い試験区の方が高い値を取った。

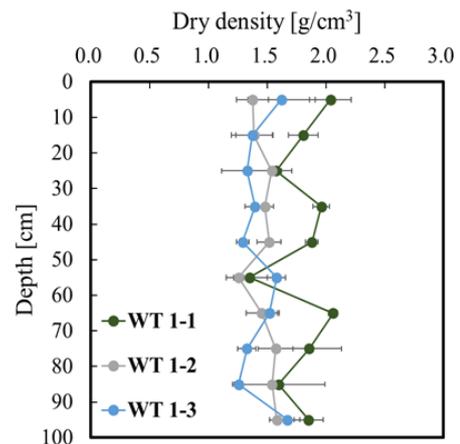


Fig. 8 WT 新規植林試験区での土壌乾燥密度比較

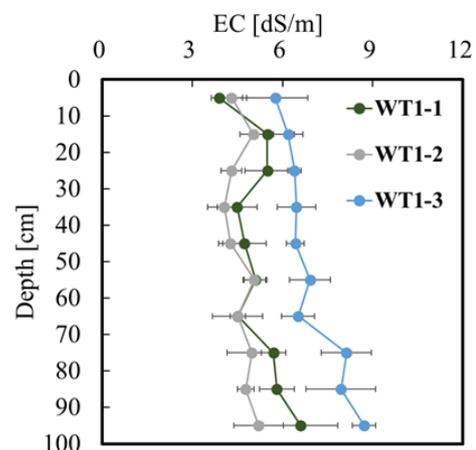


Fig. 9 WT 植林試験区での土壌 pH 比較

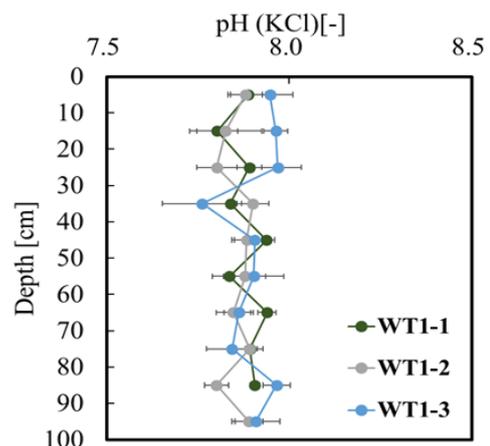


Fig. 10 WT 新規植林試験区での土壌 pH 比較

3. 2. 3 マングローブ植生地域における生態系

炭素貯留結果

マングローブ植林・再植林における生態系の回復及びそれらの温暖化対策としての評価のためには、それらの生態系における炭素貯留量の評価は重要な指標となる。生態系炭素貯留量は、地上部・地下部バイオマス中、及び、土壤中の炭素貯留量の合計で示すこととし、それらの値を、Pd 試験区、WT 試験区の両者にて値を算出して比較した。

まず、Pd 試験区での土壌有機物(SOM)量、炭素含有量について結果を示す。未生育試験区(Pd 3, Pd 4)における SOM 量は植林生育試験区(Pd 5, 6, 10)よりも低い値を取った。Pd 6 は表層土のみであり、他の試験区とは 40 cm 以深の深さ方向での数値の比較が出来ないが、SOM 値が 8~12[%](炭素量(約 4~6[%])と高い値を取った。リター含め地表分への供給量が多く、地下への浸透量も少ないことが原因の一つではないかと考えている。

次に、WT 試験区での生育良好試験区(WT 20, 21)での SOM 量について示す。表層から 50 cm までは大幅に WT 21 の方が高い値を示した。表層から 20 cm まででは、WT 20 では 6[%]程度であるが、WT 21 では 19[%]程度と約 3 倍の含有量の違いを確認できた。また、80 cm 以降ではほぼ同程度の値を示した。

そして、新規植林試験区(WT 1-1, 1-2, 1-3)では、WT 1-1 で最も低い値を取り、表層では 5[%]以下と他の試験区と比較して低い値であった。これは植生が少ないことと、潮汐による有機物の流出が多いことが原因であると考えられる。その他の地点では、植林後の生育期間が短いにもかかわらず 10[%]付近の値を取り高い値であることが確認できた。付近に植生が良好な地域もあることから、これまでマングローブ生態系を構築してきた結果にて貯留されてきたことを示している。

続いて、マングローブ樹木中における炭素貯留量について評価を行う。各植林試験区における毎木調査の結果である生育本数、樹高、胸高直径(DBH)の測定値から、地上部及び地下部バイオマス量として計算した。そして、上述の土壌有機物量から計算した土壌中炭素貯留量もあわせた生態系炭素貯留量では、Pd 試験区では、植林年数経過に伴う増加を確認することが出来た。

植林 3 年経過後の Pd 3 での約 143 [Mg-C/ha]から Pd 10 では約 231 [Mg-C/ha]に増加した。そして、生育良好な試験区である WT 20, WT 21 では、それぞれ、約 686 [Mg-C/ha], 約 860 [Mg-C/ha]と生育良好エリアの中でも、植生の良好度合いにより土壌中炭素貯留量も多いことが確認出来た。また、新規植林試験区でも植林初期での植生を確認することが出来たことで、今後の生長も期待出来、植林場所としては Pd 沖よりも適していたことを示すことが出来た。そして、これらの地域は上述したようにこれまでもマングローブ生育があった地域付近であることから土壌中の炭素貯留量も高く、なかでも一番低い沖側の WT 1-1 においても、約 496 [Mg-C/ha]で、高い WT 1-3 では約 684 [Mg-C/ha]と値に幅を示すことが分かった。

4. 考察

本申請での主たる目的でもあるマングローブ植生地域における土壌中及び生態系炭素貯留量と土壌特性などとの関係性について考察する。

まず、土壌特性と土壌中炭素含有率の関係性について検討する。新規植林試験区での比較結果から、EC 増加に伴い炭素含有率の上昇が確認され、炭素含有率と EC に正の相関が確認された ($r=0.67$)。また、含水率の増加に伴い、炭素含有率の上昇も確認され、高い正の相関性を示した ($r=0.89$)。その他、pH(KCl)、pH(H₂O)とは殆ど相関性は認められなかった。

次に、生育良好な試験区(WT20, 21)では、炭素含有率と EC に正の相関性が確認され ($r=0.78$)、EC 増加に伴う炭素含有率の上昇が確認された。また、含水率の増加に伴い、炭素含有率の上昇が確認され、炭素含有率と含水率に強い正の相関性が確認された ($r=0.92$)。そして、その他の pH(KCl)、pH(H₂O)とは負の相関性がそれぞれにおいて確認された ($r=-0.77$, -0.78)。

以上より、マングローブの成長により土壌酸性化が進行し、土壌中の微生物活動が制限された結果、有機物分解が遅くなり土壌に蓄積し¹⁵⁾、また、土壌の保水力が高まったことも上記に起因していると考えられる。

最後に、マングローブ植生試験区における生態系炭素貯留量について検討する。今回対象としたマングローブ植生試験区における生態系炭素貯留量を示す

(Fig. 11)。各試験区の炭素貯留量は各地点の平均値として示した。地上部・地下部バイオマス中の炭素量 (C_{AGB}, C_{BGB}) は、それぞれ現地で測定したバイオマスの植生本数、樹高、胸高直径(DBH)からアロメトリー式を用いて算出した。

植林初期の試験区 (WT 1-1~3) では、WT 20 とほぼ同様かさらに超える土壤中炭素貯留量を確認することが出来た (Fig. 11)。特に、WT 1-3 の陸側での数値は沖側の WT 1-1 と比較しても非常に高かった。このような植林初期 (WT 1-1~3) 試験区では、他地点よりも含水率及び EC が比較的高く確認され、さらに WT 地域での生育良好試験区 (WT 20, WT 21) も含めた試験区において、土壤中炭素含有率と含水率及び EC に高い相関が確認された ($r=0.90$, $r=0.72$) (Fig. 12, Fig. 13)。

以上より、マングローブの成長に伴い、土壤が酸性化し、微生物活動が制限され、有機物が分解されず蓄積し¹⁴⁾、さらに保水性が高まった結果も上記の結果を促進し、炭素貯留量が増加したと考えられる。また、生態系炭素貯留量は、植林後 21 年の試験区で最大値約 860 [MgC/ha] (WT 21) と推算され、タイ南部でのマングローブ再植林地域¹⁰⁾と比較しても高い炭素貯留量を示し、さらに世界平均¹⁶⁾と比較しても高い値であった。以上より、本研究対象地域におけるマングローブ植林地域における炭素貯留ポテンシャルが高いことを示すことが出来た。

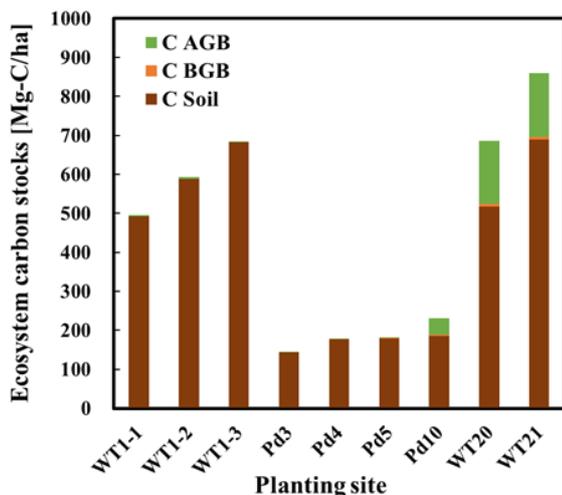


Fig. 11 全植林試験区での生態系炭素貯留量比較

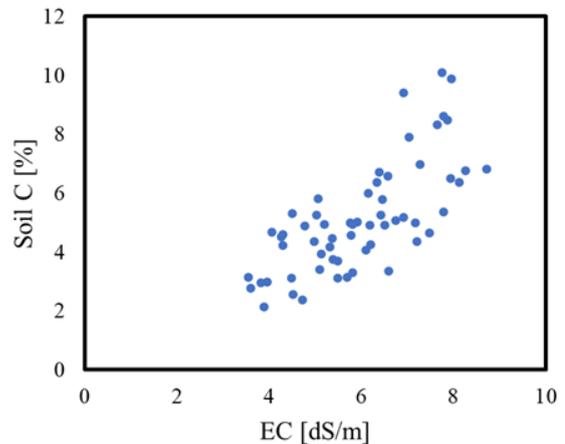


Fig. 12 植林試験区での土壤 EC と炭素含有率の関係

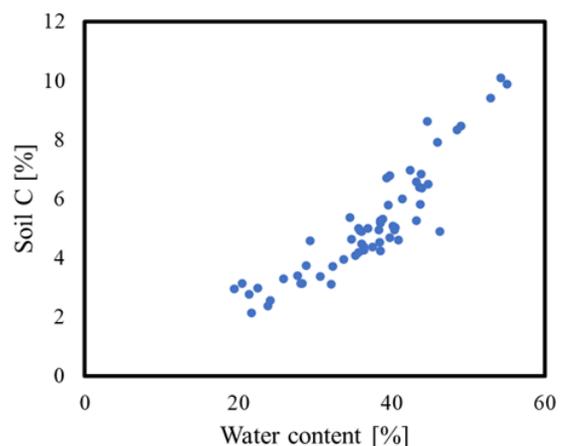


Fig. 13 植林試験区での土壤水分と炭素含有率の関係

5. 今後の課題

本研究により、ブルーカーボン生態系の中でも最大の炭素貯留量を有するマングローブの植林後の生態系炭素貯留量を、インドネシア南部スンバ島にて初めて算出することが出来た。このようなマングローブ生態系における現地調査に基づいた正確なデータは、今後のブルーカーボンの推計や生態系の活用による温暖化対策技術としての展開にも重要な知見である。

そのためにも、さらにデータの正確性を求める必要があり、測定及び生育範囲などの分析精度を高め、さらに研究を進める予定である。そして、今回検討した土壤特性以外の因子について、土壤及び生態系の炭素貯留との関係性を評価することは学術的にも意義があるため実施予定である。このように、今後も本対象地域における現地調査及び分析と解析を継続する予定である。

そして、新規植林試験区の場所を視察後に選定して新規植林を実施した結果、良好な初期生育を確認出来たことは貴重な成果である。このような成果が、インドネシアはじめ、その他の植林が成功していない地域での新規植林への有効な知見になるため、今後も生育状況や土壌特性などの有効なデータを計測する予定である。

今後、さらにマングローブ植林・再植林による地域が広がり、マングローブ生態系が発展した頃には、生態系としての修復状況を評価する必要がある。そのためには、共同研究者らとタイ南東部で実施¹⁷⁾したように、マングローブ生態系全体として、魚やエビなどの生物種も含めた食物連鎖機構の解明を実施して評価することも必要である。そして、さらにこのような生態系の修復と共に、地域の経済性や社会性の向上も評価する学際的な融合研究も必要になってくるであろう。

最後に、上述のような今後の精確な調査により得られたマングローブ生態系及び土壌炭素貯留量のデータが、より一層、温暖化対策技術としての展開に貢献出来るよう、データ及びメカニズム解析などの結果から予測に繋がるような研究も展開する予定である。

6. 文献

1. Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W. O., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L., Wilcox, J., Dominguez, M. M. Z. (2018), “Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis”, *Environmental Research Letters*, 13, 063001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>
2. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM), “Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda”, Washington, DC, The National Academies Press (2019)
3. International Union for Conservation of Nature (IUCN) (2020), “Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions: a user friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions: first edition”
4. Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds). (2009), “Blue Carbon. A Rapid Response Assessment.” United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no
5. Alongi, D. M. (2020). “Global Significance of Mangrove Blue Carbon in Climate Change Mitigation”. *Sci*, 2(3), 67. <https://doi.org/10.3390/sci2030067>
6. Richards, D. R., Friess, D. A. (2016). “Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000–2012”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(2), 344–349. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510272113>
7. Miller, M.A., Tonoto, P. (2023). “Leveraging plural valuations of mangroves for climate interventions in Indonesia”. *Sustainability Science*, 18, 1533–1547. <https://doi.org/10.1007/s11625-023-01297-1>
8. Indrajaya, Y., Yuwati, T. W., Lestari, S., Winarno, B., Narendra, B. H., Nugroho, H. Y. S. H., Rachmanadi, D., Pratiwi, Turjaman, M., Adi, R. N., Savitri, E., Putra, P. B., Santosa, P. B., Nugroho, N. P., Cahyono, S. A., Wahyuningtyas, R. S., Prayudyaningsih, R., Halwany, W., Siarudin, M., Widiyanto, A., Utomo, M. M. B., Sumardi, Winara, A., Wahyuni, T., Mendham, D. (2022). “Tropical Forest Landscape Restoration in Indonesia: A Review.” *Land*, 11(3), 328. <https://doi.org/10.3390/land11030328>
9. 赤嶺賢, 高橋弘成, 酒井裕司, インドネシア南部マングローブ植林地域における植生及び生態系炭素貯留量評価, 化学工学会第90年会要旨集 PC244, (2025).
10. Sakai, Y., Kouyama, T., Kakinuma, K., Sakaguchi, Y., Yuasa, N., Thongkao, S., Boonming, S., Chantrapromma, K., Kato, S. (2023), “Recovery of mangrove ecosystem carbon stocks through reforestation at abandoned shrimp pond in Southeast

- Thailand”. *Ecosystem Health and Sustainability*, 9, Article 0018. <https://doi.org/10.34133/ehs.0018>
11. Breithaupt, J. L., Steinmuller, H. E., Rovai, A. S., Engelbert, K. M., Smoak, J. M., Chambers, L. G., Radabaugh, K. R., Moyer, R. P., Chappel, A., Vaughn, D. R., Bianchi, T. S., Twilley, R. R., Pagliosa, P., Cifuentes-Jara, M., Torres, D. (2023). “An Improved Framework for Estimating Organic Carbon Content of Mangrove Soils Using loss-on-ignition and Coastal Environmental Setting”. *Wetlands*, 43, 57. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01698-z>
 12. Indrayani, E., Kalor, J. D., Warpur, M., Hamuna, B. (2021), “Using Allometric Equations to Estimate Mangrove Biomass and Carbon Stock in Demta Bay, Papua Province, Indonesia”, *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 263–271. <https://doi.org/10.12911/22998993/135945>
 13. Hsueh, M. L., Lee, H. H. (2000), “Diversity and distribution of the mangrove forests in Taiwan”. *Wetlands Ecology and Management*, 8, 233–242. <https://doi.org/10.1023/A:1008454809778>
 14. Primavera, J. H., Esteban, J. M. A. (2008), “A review of mangrove rehabilitation in the Philippines: successes, failures and future prospects”. *Wetlands Ecology and Management*, 16, 345–358. <https://doi.org/10.1007/s11273-008-9101-y>
 15. Gao, Y., Zhou, J., Wang, L., Guo, J., Feng, J., Wu, H., Lin, G. (2019), “Distribution patterns and controlling factors for the soil organic carbon in four mangrove forests of China”. *Global Ecology and Conservation*. 17, e00575. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00575>
 16. Alongi, D. M. (2022), “Impacts of climate change on blue carbon stocks and fluxes in mangrove forests”. *Forests*, 13(2), Article 149. <https://doi.org/10.3390/f13020149>
 17. 加藤茂, 酒井裕司, 小島紀徳 (2013), “マングローブ植林による生物多様な生態系回復と炭素隔離”, *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan*, 67, 305-317.

Evaluation of Global Warming Countermeasures by Introducing Mangrove Afforestation Technology in Southeast Asia

Yuji Sakai

Kogakuin University

Summary

The conservation and restoration of vegetated blue carbon (BC) habitats (e.g., mangroves, salt marshes, and seagrasses) is emerging as Nature-based Solutions (NbS) supporting biodiversity, climate change mitigation and adaptation, and additional ecosystem functions that support the well-being of humans and the planet. Therefore, the research effort to understand carbon stocks and fluxes within BC habitats has increased exponentially over the last decade. Mangrove forests are among the most productive blue carbon ecosystems, offering a range of ecosystem services including fisheries production, coastal protection, flood damage mitigation, and notably, carbon sequestration. Mangrove sediments hold approximately 70% of the whole ecosystem's carbon storage, varying in magnitude geographically, which is primarily determined by coastal environmental settings. Indonesia has the largest mangrove forest area in the world, estimated at around 3.36 million hectares, which represents 20-25% of the global mangrove area, and has extensively reforested mangroves to stabilize coastal ecosystems and mitigate climate change.

In this research, ecosystem carbon stocks were evaluated at the mangrove afforestation test area in Sumba Island in East Nusa Tenggara which is the southern province of Indonesia. This mangrove research site consists of two areas, the Padadita (Pd) district and Watumbaka (WT) district in the northeastern area of the island. Vegetation and soil physicochemical properties (pH, EC, water content, and dry density) in mangrove afforestation sites of no-growth and good-growth areas were examined in Pd district, and their results were compared to good vegetation area in 21 years after afforestation and new afforestation area in WT district.

As a result, ecosystem carbon stocks at the 21-year site were 860 MgC·ha⁻¹ in the WT district, which was higher than the global mean value. In addition, the afforestation test around the reforestation site indicated good results in the initial growth and soil carbon stocks. Moreover, high correlation relationships between soil carbon stock and properties such as electrical conductivity and water content were confirmed. Therefore, the recovery of carbon stocks through mangrove afforestation can contribute to blue carbon ecosystem restoration as NbS.