

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12261

研究課題名（和文）マングローブ植林による炭素貯留メカニズム解明及びポテンシャル評価

研究課題名（英文）Evaluation of carbon sequestration mechanism and potential by mangrove afforestation/reforestation

研究代表者

酒井 裕司（SAKAI, Yuji）

工学院大学・先進工学部・准教授

研究者番号：40361513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：マングローブなどのブルーカーボン生態系における炭素貯留量が陸上生態系に比べて高いことが注目されている。中でもマングローブ植林・再植林は温暖化対策技術として効果的であるため、現地での植林・再植林による生態系炭素貯留量データは重要である。しかし、炭素貯留量データの地域差と炭素貯留メカニズムは未解明である。本研究では、タイ南東部エビ養殖放棄池での再植林地と新規堆積土壌での新規植林地を対象とし、原生林と生態系炭素貯留量と土壌特性を比較した。その結果、新規植林、再植林共に植林経過年数に伴う生態系炭素貯留量の増加を確認できた。さらに原生林との比較から、炭素貯留量と土壌特性、化学量論比との関係性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブルーカーボン生態系の中でも高い炭素貯留量を有するマングローブ生態系での植林、再植林の成功事例における炭素貯留量の精確な算出は温暖化対策技術として重要な知見である。また土壌中炭素貯留量及びメカニズムについては未解明な点も多く、学術的な意義を有する。マングローブ植林・再植林は、地球環境への貢献と地域環境保全だけでなく、生態系修復による地域産業や経済性の向上にも繋がるといった社会的な意義も有する。

研究成果の概要（英文）：Mangroves, called blue carbon ecosystems, have more efficient carbon storage than terrestrial forests. In particular, afforestation/reforestation of mangroves is effective as negative emission technologies for global warming mitigation. Therefore, measuring ecosystem carbon stocks in their sites is essential. However, there is a difference in ecosystem carbon stocks in different regions and many unsolved points exist about the mechanism of high carbon stock in soil. In this research, the ecosystem carbon stocks and soil properties in mangrove reforestation sites in abandoned shrimp ponds, new afforestation sites in new mudflat, and natural forests in Southeastern Thailand have been evaluated. Consequently, ecosystem carbon stocks at their sites increased gradually across the mangrove chronosequence. In addition, soil properties and stoichiometric ratios in afforestation/reforestation sites compared to natural forests indicated a relationship with the increase in soil carbon stocks.

研究分野：環境工学

キーワード：マングローブ 植林/再植林 ブルーカーボン生態系 生態系炭素貯留量 炭素貯留メカニズム 土壌特性 化学量論比 温暖化対策技術

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

温暖化対策の国際的枠組みであるパリ協定後、世界各国の地球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)の開発及び評価が急速に進行している。NETsとは大気中のCO₂を除去・隔離する技術のことであり、植林/再植林、土壌炭素貯留、バイオ炭、風化促進や鉱物化、海洋肥沃化などの自然生態系を活用した技術や、直接CO₂を補足し貯留するDACCSやBECCSなどの技術が提案されている。なかでも、前者の自然生態系を利用した技術は、後者の技術と比較して、低コストかつ広範囲への適用可能性を有する。そして、2009年に国連環境計画(UNEP)、世界食糧機関(FAO)、ユネスコ(UNESCO)により出された報告書で、海洋生物によって大気中のCO₂が取り込まれ、海洋生態系内に貯留された炭素のことをブルーカーボン(Blue Carbon)と名付けられ、注目されている。そして、世界で生物が吸収するCO₂のうち半分以上は、海洋に生息する生物(プランクトン、海藻、塩性湿地植生など)によって吸収されていると報告されている。なかでも、海洋植物の生息場である海草藻場、塩性湿地、マングローブ生息地域は、地球上の陸地面積の僅か1%に過ぎないが、海洋堆積物中の炭素貯蔵量の半分以上を占めている。つまり、マングローブなどのブルーカーボン生態系における炭素貯留量が陸上生態系に比べて高いことが注目されており、その理由として、浅海域を含む海底泥中に貯留されたブルーカーボンが、長期間分解無機化されずに貯留され保存性が極めて高いことが挙げられる。

しかし一方で、こうした海洋生態系の吸収源は毎年7%ずつ失われており、50年前と比較して消失スピードは7倍にもなっていると報告されている。そのため、海洋生態系維持のために、更に必要な対策が講じられなければ、大半は20年以内に失われる恐れがあると指摘されている。なかでも熱帯・亜熱帯で干満のある沿岸域や河口域に広がる塩性樹木群からなる生態系の総称で、生物多様かつ生物生産性の高い生態系であるマングローブは、林産物、漁業生産物、生物育成の涵養機能、自然保全・保護機能、多様な生物の生息環境の提供、遺伝資源の宝庫であることなど多様な機能を有しているだけでなく、炭素貯留能が高いため注目されている。

そこで近年、マングローブ植生地域の炭素貯留に関連する研究報告は増加してきており、マングローブ植林・再植林は、温暖化対策技術のためのキーテクノロジーとしての有用性も議論されている。今後、マングローブ植林・再植林が温暖化対策技術として発展させるためには、現地で植生経過年数を有するマングローブ植林・再植林の成功事例における生態系炭素貯留量及び炭素貯留速度の精確かつ新たなデータ分析と評価が必要である。

2. 研究の目的

マングローブ生態系における高い炭素貯留量と炭素貯留メカニズム解明のため、タイ南東部におけるエビ養殖放棄池での再植林試験区と新規堆積土壌地域での植林試験区及び原生林を対象として、植林及び再植林後の経過年数における植生、土壌特性及び炭素貯留量を比較評価する。そして、マングローブ植林・再植林における生態系炭素貯留に関するデータを算出し、温暖化対策技術としての有効性を評価し、さらに土壌中炭素貯留メカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法

マングローブ(*R. mucronata*)林調査地域(エビ養殖放棄池・再植林、新規堆積土壌・新規植林及び原生林)(Fig.1)での土壌、地上部・地下部バイオマスによる炭素貯留量と炭素貯留メカニズム解明、更にマングローブ植林・再植林の温暖化対策技術としての評価を実施した。

下記にて、マングローブ生態系炭素貯留量及び炭素貯留メカニズムに関する詳細な実施方法を記す。

(1) 土壌中炭素貯留量評価

再植林試験区(植林後10、15、16、17、18年、植林無し(土壌堆積のみ))、新規植林試験区(植林後0.5、2.5、3.5、5、9、11年後、エビ養殖放棄池再植林試験区南部の30、40年)の生育樹木周囲の土壌(深さ2m(1mまで

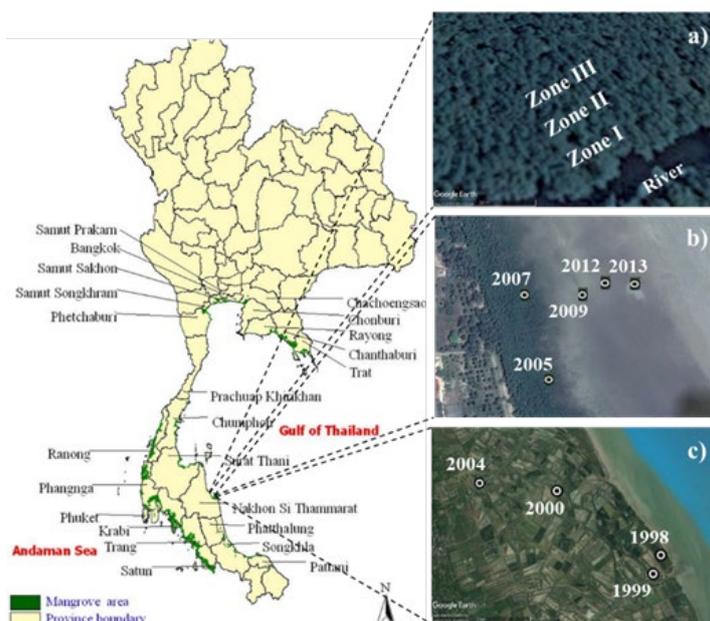


Fig. 1 タイ南東部マングローブ調査地域 (a)原生林, b)新規堆積土壌植林試験区, c)エビ養殖放棄池再植林試験区 (※図内数字は植林年)

10cm 毎、1.5、2.0m)の全炭素、全窒素含有量を定量後、有機(無機)炭素量も定量した。なお、採取時には、土壌密度、酸化還元電位、温度を全深さにて測定した。

(2) バイオマス中炭素貯留量評価

再植林試験区、新規植林試験区での生存率、樹高、胸高直径($n \geq 20$)を計測した。地上部及び地下部バイオマス重量については、アロメトリー式を使用して算出した。各部位(葉、枝、幹、根)にて重量測定した結果との比較も行った。

(3) 生態系炭素貯留量及び炭素貯留メカニズム評価

生態系炭素貯留量として、3.(1)及び 3.(2)の結果から、土壌中とバイオマス中の炭素貯留量それぞれを積算した。そして、再植林試験区と新規植林試験区のそれぞれの土壌と原生林土壌における有機・無機炭素及び窒素、有機物量、土壌粒径、含水率、pH、EC、Na イオン濃度、酸化還元電位、リン(P)、鉄(Fe)(形態別含む)、硫黄(S)、マンガン(Mn)含有量のデータから、炭素貯留メカニズムに関する要因を解析した。

4. 研究成果

(1) エビ養殖放棄池でのマングローブ再植林による生態系及び土壌中炭素貯留量評価

エビ養殖放棄池でのマングローブ再植林後(10、15、17、18 年後、植林無し)のマングローブ生育の様子を示す(Fig.2)。これらの試験区におけるマングローブ生態系炭素貯留量(バイオマス(地上部、地下部)中及び土壌中の総炭素貯留量)と土壌中炭素貯留速度を評価した。バイオマス中及び土壌中ともに炭素貯留量は植林していない試験区と比較して、顕著に増加していた。土壌中の炭素貯留量では、再植林後 18 年と植林無しとの結果を比較すると、土壌深さ 1m、2m でそれぞれ、18 年後では植林無しの約 2.1 倍、約 1.8 倍になった。このことから、明らかに再植林による、バイオマス中炭素貯留量の増加以外にも、土壌中炭素貯留量の効果を確認できた。そして、18 年間の植林経過年数に伴う土壌中炭素貯留量が次第に増加する傾向も確認することができ、今後の植林年数の経過に伴い増加することも予測された。そして、18 年後の生態系炭素貯留量は、土壌深さ 1m、2m までのそれぞれにおいて、 179.6 ± 40.5 MgC/ha、 325.0 ± 77.6 MgC/ha と測定結果から算出され、植林していない試験区(69.3 ± 8.0 MgC/ha (土壌深さ 1m)、 157.8 ± 10.9 MgC/ha (土壌深さ 2m))と比較すると 2 倍以上の数値であった。したがって、エビ養殖放棄池でのマングローブ再植林による生態系炭素貯留量の明らかな増加を確認することができた(Fig.3)。そして、生態系炭素貯留量では、まだ平均的なマングローブ生態系と比較して低いものの、炭素貯留速度は比較的に高いことも分かった。

なお、実際のバイオマス重量測定による炭素貯留量はアロメトリー式からの推算値より高かったが、本研究でのバイオマス中炭素量は、他の研究例との比較とデータ数の関係からアロメトリー式の値にて評価した。



Fig.2 タイ南東部エビ養殖放棄池マングローブ再植林試験区 (A:18 年後, B:17 年後, C:15 年後, D:10 年後, E:植林無し)

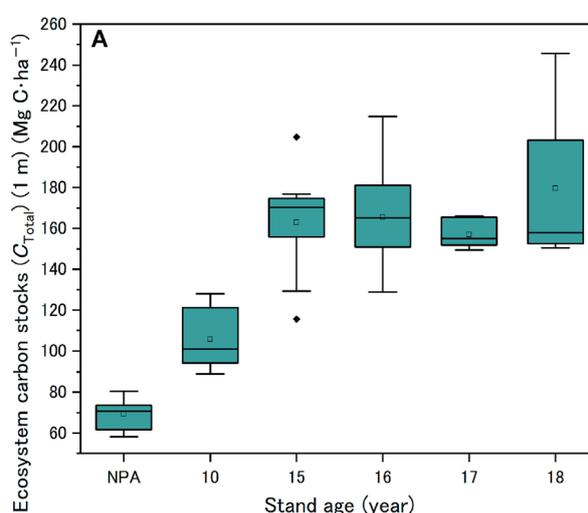


Fig.3 タイ南東部エビ養殖放棄池マングローブ再植林試験区における生態系炭素貯留量変化 (NPA: 植林無し)

(2) 新規堆積土壌でのマングローブ新規植林による生態系及び土壌中炭素貯留量評価

新規堆積土壌でのマングローブ新規植林後(0.5、2.5、3.5、5、9、11 年後)の試験区において、生態系及び土壌中炭素貯留量の評価を行った。植林後 0.5 年と植林後 11 年後の植生の様子を示した(Fig.4)。生態系炭素貯留量では、土壌深さ 1m、2m までのそれぞれにおいて、 126.5 ± 14.2 MgC/ha、 215.8 ± 32.1 MgC/ha であった。次に、土壌中では、植林後 0.5 年から 3.5 年での炭素貯留量は、ほぼ変わらなかったが、植林経過 5 年後以降で増加することが確認できた(Fig.5)。11 年での土壌中炭素貯留量は、土壌深さ 1m、2m までのそれぞれにおいて、 116.0 ± 14.2 MgC/ha、 205.2 ± 32.1 MgC/ha であった。0.5 年後の土壌中炭素貯留量は、土壌深さ 1m、2m までのそれぞれにおいて、 64.2 ± 3.9 MgC/ha、 118.0 ± 7.3 MgC/ha であったので、11 年後の数値と比較して新規植林による増加を確認することができた。さらに、エビ養殖放棄池再植林地域の南部に位置し、上述の新規植林による新規堆積土壌とは異

なる地域での新規マングローブ植林後 30 年、40 年の試験区では、生態系炭素貯留量(土壌深さ 1m)で、それぞれ、約 192.3 MgC/ha、342.8 MgC/ha と試算された。土壌中では、土壌特性の違いなどから上記の新規堆積土壌よりも少ない傾向を示したが、新規植林地域においても、植林経過年数の増加に伴い、生態系炭素貯留量の増加を確認することができた。



Fig.4 タイ南東部新規堆積土壌での新規植林試験区 (左:0.5 年後, 右:11 年後)

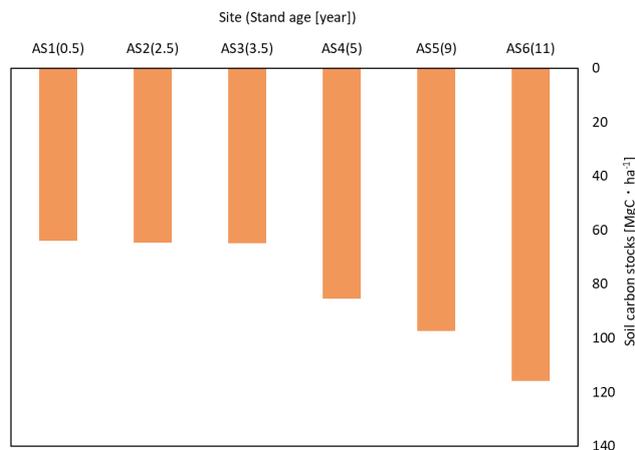


Fig.5 タイ南東部新規堆積土壌マングローブ新規植林試験区における土壌中炭素貯留量の経年変化(土壌深さ 1m)

(3) マングローブ植林・再植林による土壌中炭素貯留量及びメカニズム評価

エビ養殖放棄池での再植林試験区、新規堆積土壌地域での新規植林試験区において、土壌及び生態系炭素貯留量を原生林と比較した。原生林土壌での区画(Zone I ~ III(Fig.1))における炭素貯留量などにおける差は測定結果から確認できなかったため、区画は分けず、すべての採取地点(11 地点)での値を使用した。原生林土壌においても、生態系及び土壌中炭素貯留量の評価を行った。その結果、原生林での生態系炭素貯留量は、土壌深さ 1m、2m までにおいて、それぞれ、 741.7 ± 51.5 MgC/ha、 1245.0 ± 100.5 MgC/ha であり、土壌中炭素貯留量は、それぞれ、 456.9 ± 51.5 MgC/ha、 960.2 ± 100.5 MgC/ha であった。これらの炭素貯留量は、生態系炭素貯留量では、エビ養殖放棄池での再植林 18 年後、新規堆積土壌地域での新規植林での 11 年後と比較して、土壌深さ 1m では、それぞれ、約 4.1 倍、約 5.9 倍、土壌深さ 2m では、それぞれ、約 3.8 倍、約 5.8 倍と非常に高い数値を示していることが分かり、原生林の土壌特性とエビ養殖放棄池での再植林試験区と新規堆積土壌での新規植林試験区とのデータ比較を行うとともに、原生林での土壌特性も含めて、炭素貯留量との相関性を分析した。その結果、土壌中炭素含有量と他の成分(N、S、P、Fe(形態別含む)、Na、SOM など)含有量、土壌特性(pH、EC、ORP、温度、土壌粒度、含水率など)との相関分析から、N 含有量、SOM 含有量、含水率にて、強い正の相関性(>0.70)を、pH、 P_2O_5 含有量にて強い負の相関性を確認できた。代表例として、土壌中炭素含有率における土壌中窒素含有率との関係(Fig.6)と土壌中炭素含有率における土壌 pH との関係(Fig.7)を下記に示した。さらに、化学量論比との関係では、C を含まない N/P などと非常に強い相関性(>0.90)を示したことから、未だ化学量論比におけるマングローブ生態系での炭素貯留との関係性における議論は少ない中で重要な知見が得られた。

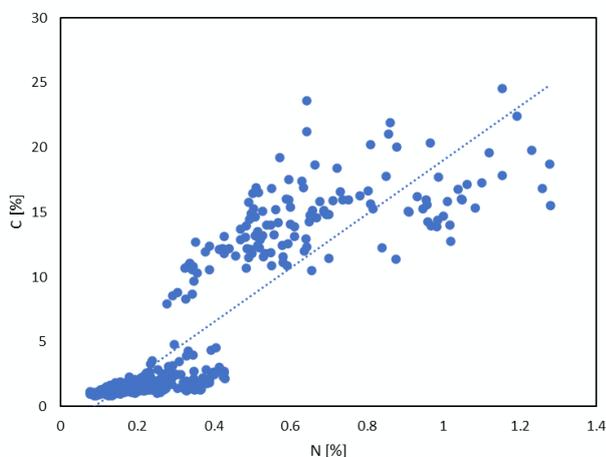


Fig.6 マングローブ生育地での土壌中炭素(C)含有率と土壌中窒素(N)含有率との関係

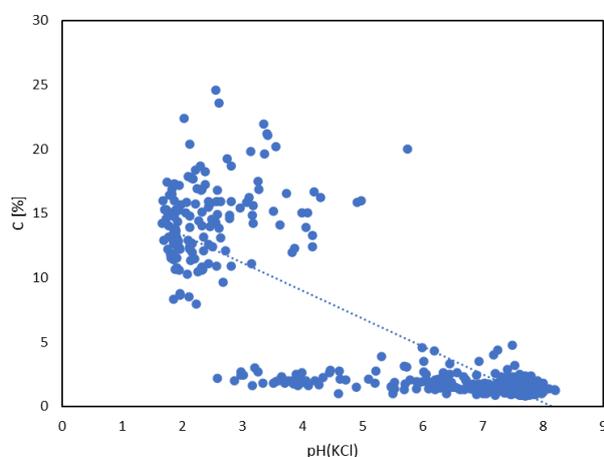


Fig.7 マングローブ生育地での土壌中炭素(C)含有率と土壌 pH との関係

(4) マングローブ再植林及び植林技術の温暖化対策技術としての可能性評価

エビ養殖放棄池伐採前後の温暖化対策技術評価に必要な関連データ収集及び解析、新規堆積土

壊及びエビ養殖放棄池植林作業などに関するデータ収集及び解析を行い、温暖化対策技術としての評価を検討した。その後、ブルーカーボン生態系修復としてのマングローブ植林・再植林技術を、炭素貯留量の観点などから温暖化対策技術としての評価を行った。その結果、マングローブ植林・再植林技術導入における生態系炭素貯留量の増加やマングローブ生態系での食物連鎖機構の修復を含めた知見、バイオマス資源としての利用などから、マングローブ植林・再植林技術の温暖化対策技術としての妥当性を示すことができた。その他にも、今後はマングローブ生態系修復に伴う地域の経済性向上、また、沿岸生態系の環境改善における効果の評価方法も含めた新たな方法論の必要性も確認することができた。

<引用文献>

- (1) 酒井裕司、ブルーカーボン生態系修復による温暖化対策の現状と今後の展開、季報エネルギー総合工学、47 巻第 1 号、1-13、2024 年
- (2) Sakai Y, Kouyama T, Kakinuma K, Sakaguchi Y, Yuasa N, Thongkao S, Boonming S, Chantrapromma K, Kato S. Recovery of Mangrove Ecosystem Carbon Stocks Through Reforestation at Abandoned Shrimp Pond in Southeast Thailand. *Ecosyst. Health Sustain.* 2023;9: Article 0018. <https://doi.org/10.34133/ehs.0018>
- (3) Yuya Sakurai, Jun Kobayashi, Yuji Sakai, Ichiro Naruse, Pyrolysis and steam gasification properties of mangroves, *Chemosphere*, 345, 14038

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sakai Yuji, Kouyama Takahiro, Kakinuma Ken-ichi, Sakaguchi Yuichi, Yuasa Nao, Thongkao Suthira, Boonming Savettachat, Chantrapromma Kan, Kato Shigeru	4. 巻 9
2. 論文標題 Recovery of Mangrove Ecosystem Carbon Stocks Through Reforestation at Abandoned Shrimp Pond in Southeast Thailand	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Ecosystem Health and Sustainability	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34133/ehs.0018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 酒井裕司	4. 巻 84(7)
2. 論文標題 パリ協定後の温暖化対策技術としての植林/再植林及び土壌炭素貯留	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学工学会誌	6. 最初と最後の頁 353
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 酒井裕司	4. 巻 47(1)
2. 論文標題 ブルーカーボン生態系修復による温暖化対策の現状と今後の展開	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 季報エネルギー総合工学	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 酒井裕司	4. 巻 67
2. 論文標題 自然を基盤とした沿岸生態系修復によるブルーカーボン貯留	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本福祉大学経済論集	6. 最初と最後の頁 13-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuji Sakai
2. 発表標題 Changes in Blue Carbon Stocks through Mangrove Forestation in Thailand
3. 学会等名 International Conference on Environmental Sustainability and Climate Change (ICESCC2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井裕司, 宍戸翔太, Suthira Thongkao, Savettachat Boonming, Kan Chantrapromma, 加藤茂
2. 発表標題 タイ南東部マングローブ植林・再植林による炭素貯留速度及び貯留量評価
3. 学会等名 化工学会第53回秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井裕司, 木谷優平, 宍戸翔太, Suthira Thongkao, Savettachat Boonming, Kan Chantrapromma, 加藤茂
2. 発表標題 タイ南東部でのマングローブ新規植林・再植林による炭素貯留量評価
3. 学会等名 化学工学会第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuji Sakai, Yuhei Kitani, Suthira Thongkao, Savettachat Boonming, Kan Chantrapromma, Shigeru Kato
2. 発表標題 Evaluation of mangrove ecosystem carbon stocks through afforestation and reforestation in Southeast Thailand
3. 学会等名 Eurosoil 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 穴戸翔太, 木谷優平, Suthira Thongkao, Savettachat Boonming, Kan Chantrapromma, 加藤茂, 酒井裕司
2. 発表標題 タイ南部マングローブ植林による土壌炭素貯留メカニズム評価
3. 学会等名 化工学会第52回秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Sakai
2. 発表標題 Afforestation and Soil Carbon Sequestration as Negative Emission Technologies (Plenary Lecture)
3. 学会等名 International Conference on Environment and Sustainability (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Sakai, Yuhei Kitani, Shota Shishido, Suthira Thongkao, Savettachat Boonmin, Kan Chantrapromma, Shigeru Kato
2. 発表標題 Changes in carbon accumulation and soil properties through mangrove forestation in Southeast Thailand
3. 学会等名 International Conference on Arid Land: Desert Technology XV (DT XV) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井裕司
2. 発表標題 ブルーカーボン生態系修復による温暖化対策
3. 学会等名 エネルギー総合工学研究所第434回月例研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

工学院大学教員プロフィール
<https://er-web.sc.kogakuin.ac.jp/Profiles/7/0000658/profile.html>
工学院大学先進工学部環境化学科環境修復工学研究室
https://www.kogakuin.ac.jp/ecce/labo_7.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	加藤 茂 (Kato Shigeru)	成蹊大学	
研究協力者	チャントラプロンマ カン (Chantrapomma Kan)	ハジャイ大学	
研究協力者	ブーミング サベタチャット (Boonming Savettachat)	国立公園・野生動物・植物保全局(タイ)	
研究協力者	ソンカオ スチラ (Thongkao Suthira)	ワライラック大学	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
インド	Raja Narendralal Khan Women's College	CSIR India	Techno India University	他5機関