



マングローブ林生態系における天然有機物の分布特性と機能

木田, 森丸

(Degree)

博士 (農学)

(Date of Degree)

2018-03-25

(Date of Publication)

2019-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7211号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007211>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文内容の要旨

氏名 木田 森丸

専攻・講座 生命機能科学・農環境生物学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

マングローブ林生態系における天然有機物の分布特性と機能

指導教員 藤嶽 暢英

第1章

マングローブ林は、炭素プールとしての重要性を受けて「Blue Carbon」として世界的な保全の対象となっている。しかしながらマングローブ林の現在の年間 CO₂ 固定量を植樹によって倍増させたとしても世界の年間 CO₂ 放出量の僅か 0.58%にすぎず、マングローブ林面積を世界的に増加させても大気中 CO₂ の削減に有意に寄与するとは考えづらい。むしろ、マングローブ林保全プロジェクトの短中期レベルでの価値は、沿岸海域や人間社会に与えるマングローブ林の多様な生態系サービスによるところが大きい。本研究においてはそうした考えに立脚し、特にマングローブ林の基盤サービスおよび調整サービスの多くにとって重要な因子である土壌有機物 (Soil Organic Matter, SOM) および溶存有機物 (Dissolved Organic Matter, DOM) の分布や特性の解析を目的として研究をおこなった。マングローブ林生態系サービスにおける SOM の重要性は炭素プールの担い手であることと生元素の循環や汚染物質の移動集積に影響を与えることであり、DOM の重要性は微量金属元素および栄養塩を沿岸海域へ供給することである。SOM・DOM の循環速度や機能性はそれらの組成や化学構造特性によって異なるために対象とするマングローブ林ごとに化学構造特性を分析することが重要になる。一方で、マングローブ林生態系における精力的な炭素動態研究にもかかわらず、マングローブ林の SOM 蓄積機構は明らかでない。マングローブ林が陸上の森林生態系とまったく異なる点は、海水に漬かる機会を持つという点に尽きる。この特殊な環境は高塩濃度の影響による SOM の凝集沈殿という可能性をもたらす。本論文ではこの点を考察するモデル実験をおこない、マングローブ林土壌の SOM 蓄積メカニズムに新たな可能性を提示することを試みた。

第2章

DOM は水への相対的な溶解性によりフミン物質 (Humic Substances, HS) と非フミン物質 (non-HS, NHS) に大別することができる。HS/NHS 分画定量には非イオン性 DAX-8 樹脂による分画定量法が用いられるが、HS は高分子電解質としての性質ゆえに pH や塩濃度のような溶液の化学性によってその立体構造を変化させ、HS と DAX-8 樹脂との疎水的相互作用は何らかの影響を受ける可能性がある。本章では、HS と DAX-8 樹脂との疎水的相互作用が溶液の塩濃度の増加によってどのような影響を受けるのかを確かめ、塩濃度の変動するマングローブ林生態系における DAX-8 樹脂を用いた分画定量法の妥当性を検証した。海水塩の影響程度は HS の化学構造特性により異なることが想定されたため、化学構造特性の対照的な標準試料を用意した。すなわち、芳香族性試料として Suwannee River フルボ酸と Nordic Reservoir フルボ酸を、脂肪族性試料として Pony Lake フルボ酸と Lake Biwa フルボ酸を使用した。結果としては脂肪族性試料の樹脂吸着割合は塩濃度による影響は受けず、芳香族性試料の樹脂吸着割合は塩濃度の上昇に応じて減少したものの、その減少程度はわずか 3%以下だった。これらの結果から、海水までの塩濃度は HS と DAX-8 樹脂間の疎水的相互作用に大きな影響は与えず、DAX-8 樹脂を用いた HS の分別定量結果は塩濃度に左右されないと結論づけた。さらにこのことは、DAX-8 樹脂

(氏名： 木田 森丸 NO. 2)

により分離精製された HS の化学構造特性は塩濃度に左右されず、塩濃度の異なる水系同士でもそれらの結果を互いに比較できることを意味している。この結果を受け、第 3 章・第 4 章・第 5 章において、塩濃度の変動するマングローブ林生態系における DAX-8 樹脂を用いた HS/NHS 分画定量および HS の抽出精製ならびに特性評価をおこなった。

第 3 章

DOM を生物地球化学的機能の異なる HS・NHS に分画定量して動態を把握することはマングローブ林生態系サービスを評価する上で重要である。しかしながら、分析対象としては希薄な DOM 中の HS 組成を分析することは容易ではなくその定量的評価は少ない。本章では、石垣島吹通川において HS/NHS 分画定量をおこない、源流—マングローブ林内—海における DOM の特性および組成変化の把握を試みた。サンプリングは吹通川の源流部から湾にかけて 7 地点において 2013 年 5 月から 2016 年 6 月にかけて合計 15 回おこない、満潮時 1 回を除きすべて干潮時におこなって合計で 103 試料を得た。分析の結果、マングローブ林土壌からの HS・NHS 両成分の供給が認められた。また、HS/NHS 分画定量と並行して DOM の光学的分析（紫外・可視吸収スペクトル、三次元励起蛍光分析）もおこない、マングローブ林河川における報告例の多い DOM の光学的特性の変化をその HS/NHS 組成変化によって初めて明示した。さらに、多量の降雨による塩濃度の低下に伴い SOM が可溶化して河川へと供給されることを見出した。降雨条件や水文条件によってマングローブ林炭素動態が変化することはマングローブ林の炭素動態を考えるうえで極めて重要である。マングローブ林によって水文学的環境は異なり、塩濃度によって優先するマングローブ樹種や成長速度も異なるため、水文学的環境をパラメータとしてマングローブ林を分類したうえでその生態系サービスを評価する必要性が示された。

第 4 章

マングローブ林土壌の SOM 蓄積メカニズムに新たな可能性を提示することを目的とし、マングローブ林内土壌の塩濃度を変動させた際に SOM がどのような挙動を示すかを検証した。第 3 章と同じ石垣島吹通川マングローブ林に加えてタイ王国トラート県トラート川河口のマングローブ林において植生の異なる 3 地点から採取した試料も用いた。石垣島試料においては人工海水および超純水を用いて 6 回の逐次洗浄をおこない、抽出液に対して HS/NHS 分画定量をおこなった。人工海水を用いた場合には HS・NHS 濃度は洗浄に伴い漸減した。超純水を用いた場合には塩濃度は指数関数的に低下した一方で HS 濃度は 2 回目の洗浄で 2 倍に上昇し、塩濃度の低下により HS が液相に移行溶出したことが確認された。トラート試料においては超純水を用いて 6 回の逐次洗浄をおこない、抽出液を酸性化してフミン酸画分を沈殿分離したのちに上澄み液に対してフルボ酸/NHS 分画定量をおこない、沈殿分離前後の差し引きでフミン酸画分濃度を算出した。全ての植生帯において石垣島試料と同様に指数関数的に塩濃度は低下し、それに伴いフミン酸画分濃度が 3, 4 倍に上昇した。石垣島試料・トラート試料において HS の分散が認められ

(氏名： 木田 森丸 NO. 3)

た塩濃度は 200 mS m^{-1} 以下であった。これらの結果は塩濃度の低下により HS が可動化する可能性を示しているものの、石垣島吹通川マングローブ林においては地形・水文学上、河川による海水塩の希釈効果は小さく、林内土壌中の塩濃度が高いからこそ HS は凝集沈殿して蓄積されていることが強く示唆された。一方、トラートにおいては雨季の集中的降雨により淡水が長期間優先し、マングローブ林土壌表層の塩濃度が数カ月間ほぼ 0 になるとの報告がある。もしもこの現象がトラート川河口マングローブ林全域において起こるのであれば、乾季には高塩濃度によりフミン酸画分が凝集・蓄積し、雨季には塩濃度の低下により一度に放出されるという季節性を示す可能性が示唆された。

第 5 章

低 SOM 含量のマングローブ林が世界的には主要であるにも関わらずそういったマングローブ林の SOM 研究は不足している。第 3 章と同じ石垣島吹通川河口マングローブ林において多地点土壌採取をおこない、土壌深度は 1 m 程度であることおよび SOM 含量は 5C% 以下であり比較的低いことを確認後、1 m PVC パイプコアサンプラーを用いて 1 m コアを採取した。コア試料は 25cm 深別に 4 等分し、フミン酸およびフルボ酸を抽出してそれらの分析をおこなった。光学的分析・元素分析・NMR 分析の全てにおいて、深度に伴うフミン酸の腐植化（吸光度の増加・H/C, N/C の低下・リグニンピークの減衰・芳香族度の上昇）が認められた。全深度においてフルボ酸の 2 倍存在していたことから、フミン酸はマングローブ林土壌における SOM 分解のよい指標として用いることができると考えられた。フミン酸は海水への溶解度は低く重金属元素や疎水性有機汚染物質との相互作用も高いのでそれらの元素や物質をマングローブ林土壌に固定・保持する役割を果たしていると考えられる。さらに、第 3 章・第 4 章で論じたような淡水の流入によるフミン酸の可溶化、沿岸への放出があるとすると、フミン酸と共にマングローブ林土壌へ固定された汚染物質の集中放出も考えうる。一方のフルボ酸は深度に伴う明瞭な変化は示さず、フミン酸と比較して分子の多様性が小さくより酸化分解が進み含酸素官能基に富む成分であると考えられた。フルボ酸は第 2 章において示したように海水可溶であったことから、微量元素の沿岸海域への運搬に重要であると考えられる。このように、フミン酸およびフルボ酸の生物地球化学的・生態学的役割は異なることが明白であり、マングローブ林生態系における物質循環や生態系サービスを考察する際には両成分を区別して考えることの重要性が示された。

本研究においてはマングローブ林生態系における天然有機物の組成変化や化学構造特性の詳細な情報を示したのみならず、降雨条件や水文条件によってマングローブ林炭素動態が変化することを一貫して論じており、「水文環境を考慮したマングローブ林生態系における物質循環論」を新たに提唱し、検証・構築する必要性を提示した。

氏名	木田 森丸		
論文 題目	マングローブ林生態系における天然有機物の分布特性と機能		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	藤嶽 暢英
	副 査	教 授	土佐 幸雄
	副 査	教 授	前藤 薫
	副 査		印
	副 査		印

要 旨

マングローブ林は、炭素貯蔵庫としての重要性を受けて世界的な保全対象となっている。しかしながらマングローブ林の現在の年間 CO₂ 固定量を植樹によって倍増させたとしても世界の年間 CO₂ 放出量の僅か 0.58% にすぎず、大気中 CO₂ の削減に有意に寄与するとは考えづらい。むしろ、マングローブ林保全プロジェクトの価値は、沿岸海域や人間社会に与えるマングローブ林の多様な生態系サービスに依る。本研究はそうした考えに立脚し、特にマングローブ林の基盤・調整サービスの多くにとって重要な因子である土壌有機物 (Soil Organic Matter, SOM) および溶存有機物 (Dissolved Organic Matter, DOM) の分布や特性の解析を目的としておこなわれたものである。マングローブ林生態系サービスにおける SOM の重要性は炭素プールの担い手であることと生元素の循環や汚染物質の移動集積に影響を与えることであり、DOM の重要性は微量金属元素および栄養塩を沿岸海域へ供給して一次・二次生産を支えることである。SOM・DOM の循環速度や機能性はそれらの組成や化学構造特性によって異なるために対象とするマングローブ林ごとに化学構造特性を分析することが重要になる。一方で、マングローブ林生態系における精力的な炭素動態研究にもかかわらず、マングローブ林の炭素貯蔵庫としての SOM 蓄積機構は明らかでない。マングローブ林が陸上の森林生態系と最も異なる点は、海水に漬かる機会を持つという点に尽きる。この特殊な環境は高塩濃度の影響による SOM の凝集沈殿という可能性をもたらす。本論文ではこの点を考察するモデル実験をおこない、マングローブ林土壌の SOM 蓄積メカニズムに新たな可能性を提示することを試みている。

第 1 章では、マングローブ林生態系研究の歴史的背景、マングローブ林生態系サービスにおける天然有機物の研究意義、特に分布特性や組成、化学構造特性について把握することの重要性について論述し、本研究の目的を示している。

第 2 章では、続く第 3 章・第 4 章・第 5 章で利用している分画定量法について、塩濃度の影響を検証し、本手法の妥当性について保証を得ている。DOM は水への相対的な溶解性によりフミン物質 (Humic Substances, HS) と非フミン物質 (non-HS, NHS) に大別することができる。HS/NHS 分画定量には非イオン性 DAX-8 樹脂による分画定量法が用いられるが、HS は高分子電解質としての性質ゆえに溶液の塩濃度によってその立体構造を変化させ、HS と DAX-8 樹脂との疎水的相互作用に何らかの影響を与える可能性がある。したがって、塩濃度の変動するマングローブ林生態系においては、DAX-8 樹脂を用いた分画定量法の妥当性を保証する必要がある。海水塩による影響程度は HS の化学構造特性によって異なることが想定されたため、化学構造特性の対照的な標準試料 (国際学会頒布)、すなわち、芳香族性ならびに脂肪族性に富む試料をそれぞれ使用し、脂肪族性試料の樹脂吸着割合は塩濃度による影響は受けず、芳香族性試料の樹脂吸着割合は塩濃度の上昇に応じて減少したものの、その減少程度はわずか 3% 以下であることを明らかにしている。この結果から、海水までの塩濃度は HS と DAX-8 樹脂間の疎水的相互作用に大きな影響は与えず、DAX-8 樹脂を用いた HS の分画操作は塩濃度に左右されないことを結論づけている。

第 3 章では以下の研究を実施している。DOM を生物地球化学的機能の異なる HS・NHS に分画して動態を把握することはマングローブ林生態系サービスを詳細に評価する上で必要である。しかしながら、分析

氏名	木田森丸		
論文 題目	対象としては希薄な DOM 中の HS 組成を分析することは容易ではなくその定量的評価は少ない。そこで石垣島吹通川マングローブ林河川において HS/NHS 分画定量をおこない、源流-マングローブ林内-海における DOM の特性および組成変化の把握をおこなっている。分析の結果、マングローブ林土壌からの HS・NHS 両成分の供給を見出している。さらに、DOM の光学的分析 (紫外・可視吸収スペクトル、三次元励起蛍光分析) を併せておこなうことで、マングローブ林河川における DOM の光学的特性の変化を HS/NHS 組成変化の観点から初めて解析している。加えて、多量の降雨による塩濃度の低下に伴い SOM が可溶化して河川へと供給されることを見出している。降雨条件や水文条件によってマングローブ林炭素動態が変化することはマングローブ林の炭素動態を考えるうえで極めて重要である。マングローブ林によって水文学的環境は異なり、塩濃度によって優先するマングローブ樹種や成長速度も異なるため、水文学的環境をパラメータとしてマングローブ林を分類したうえでその生態系サービスを評価する必要性を提示している。		
第 4 章では、マングローブ林土壌の SOM 蓄積メカニズムに新たな可能性を提示することを目的とし、マングローブ林内土壌の塩濃度を変動させて SOM の挙動を検証している。第 3 章と同じ石垣島吹通川マングローブ林土壌について、人工海水および純水を用いた 6 回の逐次洗浄をおこない、洗浄 (抽出) 液の HS/NHS 分画定量を実施している。その結果、人工海水を用いた場合には HS・NHS 濃度は洗浄に伴い漸減したが、純水を用いた場合には塩濃度は指数関数的に低下した一方で HS 濃度は 2 回目の洗浄で 2 倍に上昇し、塩濃度の低下により HS が可溶化したことを示している。ただし、吹通川においては地形・水文学上、河川による海水塩の希釈効果は小さく、林内土壌中の塩濃度が高いからこそ HS は凝集沈殿して土壌に蓄積されていることを述べている。続いて、タイ王国トラート川河口のマングローブ林において植生の異なる 3 地点から採取した試料を用いて同様の逐次洗浄をおこない、洗浄 (抽出) 液を酸性化してフミン酸画分を沈殿分離したのちに上澄み液に対してフルボ酸/NHS 分画定量をおこない、沈殿分離前後の差し引きでフミン酸画分濃度を算出している (HS はフミン酸とフルボ酸に大別される)。その結果、全ての植生帯において石垣島試料と同様に指数関数的に塩濃度は低下し、それに伴いフミン酸画分濃度が 3、4 倍に上昇したことを示している。トラートにおいては雨季の集中豪雨によりマングローブ林土壌表層の塩濃度が数か月間ほぼ 0 になるとの報告があり、乾季には高塩濃度によりフミン酸画分が凝集・蓄積し、雨季には塩濃度の低下により一度に放出されるという季節性を示す可能性を考察している。			
第 5 章では、低 SOM 含量のマングローブ林が世界的には主要であるにも関わらず、そうしたマングローブ林の SOM 研究は不足していることを指摘した上で、吹通川マングローブ林土壌のフミン酸およびフルボ酸について深度別に分析した結果について論述している。光学的分析・元素分析・NMR 分析の全てにおいて、深度に伴うフミン酸の腐植化 (吸光度の増加・H/C、N/C の低下・リグニンピークの減衰・芳香族度の上昇) が認められ、全深度においてフミン酸がフルボ酸の 2 倍存在していたことから、フミン酸はマングローブ林土壌における SOM 分解の指標として用いることができることを提唱している。フミン酸は海水への溶解度が低く、重金属元素や疎水性有機汚染物質との相互作用も高いのでそれらの元素や物質をマングローブ林土壌に固定・保持する役割を果たしていることも述べている。さらに、淡水の流入によるフミン酸の可溶化、沿岸への放出があるとすれば、マングローブ林土壌に固定された汚染物質の集中放出の可能性もあることを考察している。一方、フルボ酸は深度に伴う明瞭な変化は示さず、フミン酸と比較して分子の多様性が小さいことを示し、フルボ酸が海水可溶であることを踏まえて、微量金属元素の沿岸海域への運搬に重要であることを考察している。以上の結果から、フミン酸およびフルボ酸の生物地球化学的・生態学的役割は異なることが明白であり、マングローブ林生態系における物質循環や生態系サービスを考察する際には両成分を区別して考えることの重要性を明示している。			
第 6 章では総合考察として、第 2 章から第 5 章までの研究成果を総括している。特に、降雨条件や水文条件によってマングローブ林の炭素動態が変化する結果を通じて、今後の新たな研究展望として「水文環境を考慮したマングローブ林生態系における物質循環論」の検証・構築が必要であることを提唱している。			
本研究は、マングローブ林の持つ基盤・調整サービスにとって重要な因子である土壌有機物と溶存有機物について、その分布や特性の解析を研究したものであり、土壌学、生態学、地球科学、環境科学の諸分野にまたがる多くの重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者木田森丸は、博士 (農学) の学位を与える資格があると認める。			