

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：13701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24657016

研究課題名(和文) マングローブ林の炭素循環 土壤生態学の創生

研究課題名(英文) Soil organic carbon pools and dynamics in a mangrove forest

研究代表者

大塚 俊之(OHTSUKA, Toshiyuki)

岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授

研究者番号：90272351

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：マングローブ林の巨大な土壤炭素プールの動態を解明するために、生態系生態学と土壤有機化学との連携研究を行った。森林の地上部リターのほとんどは潮位変動により系外へ流出したが、細根ネクロマスは土壤の深い場所で多かった。従来測定されていなかった、水面からのCO<sub>2</sub>フラックスとCWD分解呼吸を含めると分解呼吸量は2倍程度になった。一方で、河川源流部ではフミン物質(HS)の割合が大きく、マングローブ林内の塩の影響によって土壤へのHSの選択的な収着・保持が認められた。これらの結果から、細根の生産・枯死と河川上部からの有機物の流入がマングローブ林の土壤炭素蓄積に重要と考えられた。

研究成果の概要(英文)：To reveal the dynamics of soil organic matter, we conducted the study of ecosystem ecology and soil organic chemistry in a mangrove forest on an estuary of the Fukido River, Ishigaki Island, southern Japan. Almost aboveground fine litter flowed away from the mangrove forest due to the ebb tide, but belowground fine litter (necromass of fine root) was higher in the deep soil. Heterotrophic respiration is rather high because of CO<sub>2</sub> fluxes from water surface at high tide and CWD decomposition at low tide. Concentrations of humic substances (HS) in the headwaters of Fukido River are higher than other river water, and HS was absorbed by mangrove soil due to high salinity. These data suggested that high fine root production/decomposition and DOC (HS) input from terrestrial evergreen forest through the river is important for soil accumulation in mangrove forests.

研究分野：生態学

キーワード：マングローブ林 土壤圏炭素 炭素蓄積 溶存有機物 純一次生産量 微生物呼吸量 生態系純生産量

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、森林生態系における炭素循環と土壌への炭素蓄積プロセスについて長年研究しており、吸収された炭素の蓄積場所として樹木バイオマスだけでなく、土壌圏を中心とする非生物的炭素プールの役割を指摘した。このような土壌圏炭素プールの動態を解明するためには生態系生態学と土壌有機化学の連携による新たな方法論が必要である。このような中で、マングローブ林は生態学的な物質生産の視点から見ると、その地上部純生産量が熱帯林と同程度に高く、地下部バイオマスの割合が非常に高いことが分かってきた。さらに土壌化学的な視点からは、潮汐による還元的な環境下のマングローブ林の土壌有機物量は、日本の森林土壌の倍以上である。マングローブ林のバイオマスや土壌炭素プールの定量的研究は多く見られるが、土壌炭素（腐植）の蓄積プロセスについての研究はほとんどなく、マングローブ林をフィールドとして、生態学と土壌学の連携によって陸上生態系の非生物的プールの動態を明らかにするための新たな方法論である「土壌生態学」を創生する。

### 2. 研究の目的

マングローブ林での土壌炭素動態は、マングローブ林そのもののリターだけでなく、上流部の森林や水中の藻類・海草類に由来する有機物が集積すること、また河口の特殊な環境下（塩類や潮汐）での土壌化学的・微生物学プロセスの存在など、通常の森林土壌に比べて複雑である。本研究では生態学と土壌学の連携により「マングローブ林の土壌炭素がなぜ多いか?」、「森・川・海の生態系が土壌炭素蓄積にどのように寄与しているか」について明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では主に次の二つの側面からの研究を行い、マングローブ林の巨大な土壌炭素蓄積に与える、森川海の連環と微生物学的・

土壌化学的プロセスの二つの影響を定量的に評価する。

**河口部マングローブ林での有機物の生産・分解・堆積プロセスの解明**：炭素循環の調査のために、石垣島吹通川河口におけるマングローブ林内 (24°29' N, 124°14' E) に永久方形区 (80 m× 80 m) を設置した。また 2013 年 5 月にリタートラップ (50 cm<sup>2</sup>) を方形区内の 16 ヶ所に設置して、2 ヶ月に一度回収した。森林構造と森林生産量の推定のために 2014 年 1 月に永久方形区内において、樹高 1.3 m 以上の個体について毎木調査 (DBH, 樹高、葉群下高、樹木位置) を行った。また方形区内の一部において枯死木の調査を行った。さらに樹木の成長を調べるために、2015 年 1 月に直径 5 cm 以上のすべての生残個体について DBH の再測を行った。

土壌有機物の分解フラックスについては、赤外線ガス分析器を備えた自動開閉式・手動式密閉法を用いて、土壌呼吸と CWD 呼吸の季節・日変化の測定を行った。土壌呼吸はそれぞれ 40 地点において年に 4 回、また CWD 呼吸は様々な太さのものを年に 3 回測定を行い、環境要因との相関関係を明らかにした。

さらに土壌圏炭素 (SOM) プールの測定のために、吹通川河口付近のヤエヤマヒルギ群落から、上流のオヒルギ群落まで、河川に沿って 6 ヶ所のサイトで、表層から 1 m までの深度で 10 cm 毎に一定体積の土壌をサンプリングした。土壌は乾燥させて仮比重を求めると共に、一部のサンプルは風乾して C/N アナライザーによる全炭素量の測定と、炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) の測定を行った。

**森川海連環による流域レベルでの有機物集積プロセスの解明**：溶存有機物 (DOM) の多くの機能を担い、かつ難分解性成分として考えられているフミン物質 (Humic Substances, HS) の組成を DOM の質的評価法として取り入れることで、沖縄県石垣島吹通川のマングローブ林域において、上流部から河口の海水域までの水をサンプリングして、DOM の特性把握を試みた。水試料の DOM と HS 定量は DAX-8

樹脂吸着・炭素量測定法を用いた。

#### 4. 研究成果

方形区内の群落高は約 12 m で幹数密度は 2447 本 ha<sup>-1</sup>に達した (表 1)。乾重ベースのバイオマスは、地上部 294 ton ha<sup>-1</sup>、地下部粗根は 122 ton ha<sup>-1</sup>と推定され、85%をオヒルギが、残りをヤエヤマヒルギが占めていた。

表 1. 永久方形区における、1 年間の群落構造の変化と成長量

	Jan. 2014	Jan. 2015	Annual mortality ton ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>	Annual growth ton ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
Biomass (ton ha <sup>-1</sup> )				
Aboveground				
<i>Bruguiera</i>	247.9	252.4	0.51	4.98
<i>Rhizophora</i>	42.2	42.0	1.07	0.81
Total	290.2	294.4	1.58	5.78
Belowground				
<i>Bruguiera</i>	101.5	103.1	0.26	1.87
<i>Rhizophora</i>	19.1	18.9	0.50	0.33
Total	120.6	122.0	0.76	2.20
Stem density (stems ha <sup>-1</sup> )				
<i>Bruguiera</i>	1867	1853	25	
<i>Rhizophora</i>	580	561	19	
Total	2447	2414	44	

現状ではヤエヤマヒルギの枯死が多く、地上部の CWD (大型木質リター) プールは 41 ton ha<sup>-1</sup> に達した。2015 年 1 月における深度 90 cm までの細根バイオマスは 298 ± 40 g m<sup>-2</sup> (約 3 ton ha<sup>-1</sup>) で陸上の森林生態系と同程度であったが、深い深度にも多くの細根が存在した。細根ネクロマスは 24 ton ha<sup>-1</sup>にも達し、特に深い場所で多かった (図 1)。これは細根の分解が遅いだけで無く、細根ターンオーバーが短かく、地下部リターが非常に多いという可能性を示唆する。

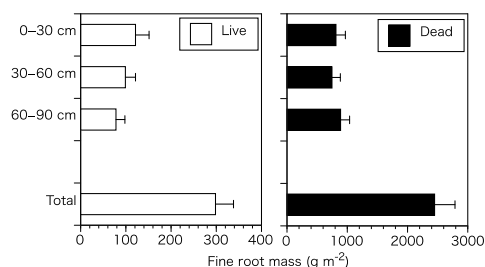


図 1. 永久方形区内の細根のバイオマス (Live) とネクロマス (Dead) の深さ別の量

また葉リター量は 5.7 ton ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>、種子リターは 0.5 ton ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>であり (図 2)、地上部木部 NPP 5.8 ton ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>と合わせて、地上部 NPP は 12.0 ton ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>と推定された。このうちバイオマス蓄積が 4.2 トンで、CWD プールへの供給が 1.6 トンであった。それ以外 (6.2 トン) は、リターとして土壤に供給されるが、潮位変動によりほぼ系外へ流出すると推定された。北限に近いマングローブ林としてはバイオマスも NPP も比較的大きかったが、地上部リターは林内の炭素蓄積には寄与していないと考えられる。

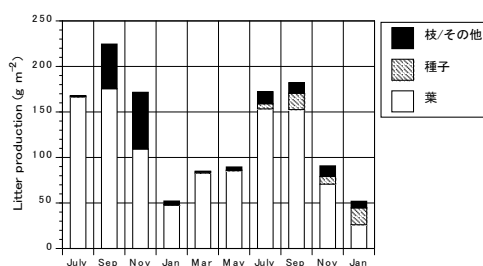


図 2. 永久方形区内のリター量の季節変化

さらに、吹通川の河口から上流部にかけて、深さ 1 m までの SOM プールを広域スケールで評価すると 291 ± 212 ton C ha<sup>-1</sup>と推定され、通常の森林生態系に比べて 2-3 倍の炭素プールが存在した。

一方で、マングローブ林土壌における微生物分解呼吸量 (HR) は、一般的に還元的条件下で低いことが想定され、干潮時の露出した土壌からの CO<sub>2</sub>放出量を測定することにより、およその値が推定されてきた。しかしマングローブ林は、1 日の内に潮位が大きく変化し (約 2 m)、季節によっては 1 日の 2/3 の時間帯を海水が覆うため、陸上生態系に比べて特異的な変動を示していると考えられる。またそれに加えて、林内には倒木といった粗大有機物 (CWD) が相当量貯蓄されているが、この分解呼吸は、これまでの HR の推定には考慮されてこなかった。

その結果、CO<sub>2</sub>放出速度は、土壌温度の他

に潮位の影響を強く受けていることが示された。また土壌の浸水時には、露出時の約3割程度のCO<sub>2</sub>が、水面から大気へ放出していることが明らかになった。さらに、浸水や露出の瞬間には、一時的にCO<sub>2</sub>放出速度が増加する現象が認められた(図3)。

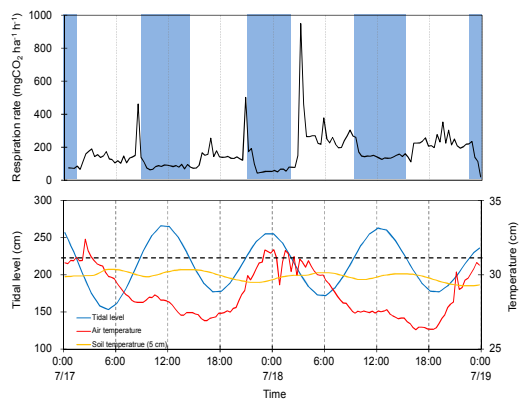


図3 土壌呼吸速度と環境要因の日変化。水色の領域は浸水時間、破線は浸水する潮位を示す。

一方、CWD呼吸においては、温度との強い相関が認められ、水面からの炭素放出と合わせて加味した場合、HRは従来推定されている値に対して2倍程度になると見積もられた(図4)。これらの結果は、従来の推定方法では、HRが大きく過小評価されていることを示唆している。今後は、さらなる連続測定により、呼吸速度・温度・潮位との関係を詳細に明らかにすることが求められる。

溶存有機物(DOM)の動態については、まずHSの樹脂への吸着挙動が試料の塩濃度によ

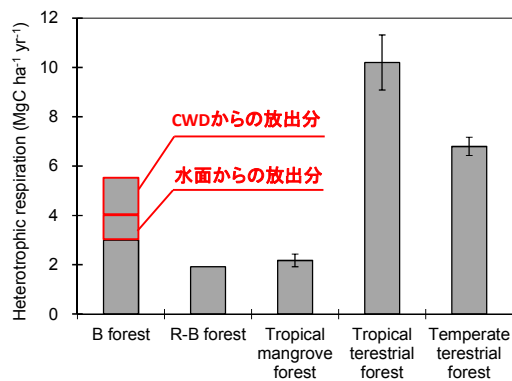


図4 マングローブ林の、一年間の従属栄養生物呼吸の推定値。

る影響を受ける可能性が考えられたため、これについて検討した。その結果、樹脂とHS間の疎水的相互作用に塩濃度が及ぼす影響は僅かであることが確認され、汽水域の水試料への適用性が保証された。この結果を受けて、吹通川における以下の研究を実施した。

源流(Point 1)から海(Point 7)にかけて採水試験した結果から(図5)、吹通川中のHS割合は源流から海にかけて減少する傾向を示し、HS割合の低い海水との混合および林内泥へのHSの選択的な吸着・保持が示唆された。また、吹通川源流水中のHS割合は他の非有色水系河川に較べて高く(55.8%~75.9%)、マングローブ林へのHSの供給源として重要な役割を果たしていることが示唆された。

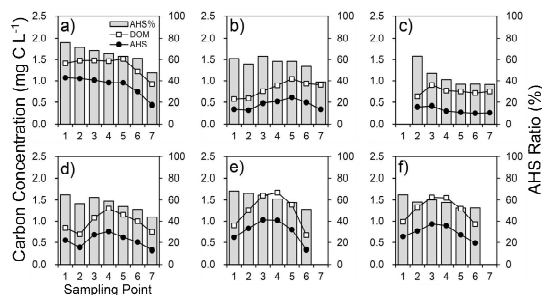


図5. DOC, AHS-C, and AHS ratio along the headwater to the sea transect in the mangrove area of Fukido River on: (a) 14 May 2013 at low tide after a heavy rain event (precipitation of 57 mm); (b) 17 January 2014 during the baseflow condition; (c) 21 January 2014 at high tide before a rain event; (d) 21 January 2014 at low tide after a light rain event (precipitation of 3 mm); (e) 30 September 2014 during the baseflow condition; and (f) 21 November 2014 during the baseflow condition. The baseflow conditions were defined as any low tide more than 48 hours after a rain event.

次に、マングローブ林内で採取した表層0~25 cmの土壌から超純水を用いて水抽出有機物(Water extractable organic matter, WEOM)を逐次抽出し、WEOM溶液中のHS(WEHS)割合を測定した(図6)。その結果、ECの低下に伴いWEOM溶液の炭素濃度とWEHS割合は共に大きく増加し、WEHSが液相に移行溶出されたことが確認された。これらの結果より、海水塩の影響により、マングローブ林内土壌に難分解性のHSが選択的に吸着・保持されることが示唆された。

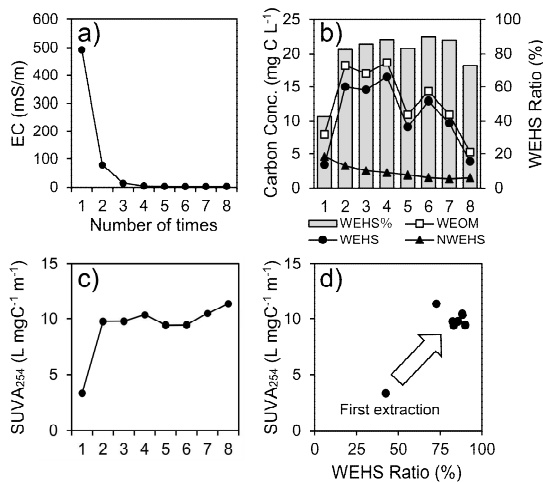


図 6. (a) EC, (b) DOC, WEHS-C, NWEHS-C and WEHS ratio, (c) SUVA<sub>254</sub>, and (d) SUVA<sub>254</sub> versus WEHS ratio of WEOM solutions obtained by each sequential extraction of the mangrove surface soil.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

1. Falster DS, Duursma RA, Isihara MI, Ohtsuka T. (他 88 名 57 番目) et al. (2015) BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants. Ecology 96(5), 1445, 査読有
2. Wijekoon, WMC, Gushiken M, Nagayama E, Kinjo K (2014) Characteristics of soil aggregate under mangroves in comparison with the aggregates of upland forest soil, assessed by density fraction. J Jpn Coastal Forest 13, 51-58, 査読有
3. 照屋健太、金城和俊 (2014) 沖縄島のブナ科が生育する森林土壌の腐植粘土複合体の特徴. 粘土科学 53, 1-7, 査読有
4. Ohtsuka T, Shizu Y, Hirota M, Yashiro Y, Jia S, Iimura Y, Koizumi H (2014) Role of coarse woody debris in the carbon cycle of Takayama forest, central Japan. Ecol Res. 29, 91-101., 査読有
5. 藤嶽暢英 (ほか 17 名) (2013) 日本の土壌

炭素賦存量を量・質の両面から考える. 日土肥誌 84, 224-229, 査読有

6. Kawahigashi, M., Ono, K., Iimura, Y., Fujitake, N. (2013) Investigations of environmental changes based on chemical analyses of humic substances. Humic Substance Res. 10, 1-9, 査読有

7. Iimura, Y., Fujimoto, M., Tamura, K., Higashi, T., Kondo, M., Uchida, M., Yonebayashi, K., Fujitake, N. (2013) Black humic acid dynamics during natural reforestation of Japanese pampas grass (*Miscanthus sinensis*). Soil Biol. Biochem. 57, 60-67, 査読有

8. Li W, Numata T, Kobayashi S, Yamada T, Li F, Otsuka T, Iimura Y (2013) Investigation of the composition and origin of particulate organic matter in a forested river. Journal of Water and Environment Technology 11, 131-142, 査読有

9. Ohtsuka T, Negishi M, Sugita K, Iimura Y, Hirota M (2013) Carbon cycling and sequestration in a Japanese red pine (*Pinus densiflora*) forest on lava flow of Mt Fuji. Ecol Res 28, 855-867, 査読有

10. Iimura Y, Hirota M, Ida H, Ohtsuka T (2013) Comparison of quantity and quality of soil organic carbon between matured and gap areas in an old-growth beech forest. J Geography 122, 723-732, 査読有

11. 大塚俊之 (2013) 山岳地域における森林生態系の炭素フラックスの時間変動とその要因. 地学雑誌 122, 615-627, 査読有

12. 金城和俊、渡嘉敷義浩 (2012) 炭酸カルシウム施用が国頭マージの水分散土壌コロイドに与える影響. 日本土壌肥料学雑誌 83, 594-598, 査読有

13. Tsuda, K., Takata, A., Shirai, H., Kozaki, K., Fujitake, N. (2012) Method for quantitative analysis of aquatic humic substances in clear water. Analytical Sci. 28, 1017-1020, 査読有

[学会発表] (計 10 件)

1. 大塚俊之, 友常満利, 飯村康夫, 藤嶽暢英, 金城和俊, V. Suchewaboripont: 「石垣島吹通川河口のマングローブ林の構造と純一次生産」第62回日本生態学会大会, 2015年3月21日, 鹿児島大学 (鹿児島県鹿児島市)

2. 友常満利, 大塚俊之, 鈴木庸平, 墨野倉伸彦, 新海恒, 吉竹晋平, 小泉博: 「亜熱帯マングローブ林における潮位変動に伴う土壌呼吸の動態」第62回日本生態学会大会, 2015年3月21日, 鹿児島大学 (鹿児島県鹿児島市)

3. 藤嶽暢英: 「マングローブ林でのDOCの動態」第62回日本生態学会大会自由集会 MAFES 「マングローブ林での土壌圏炭素動態」, 2015年3月21日, 鹿児島大学 (鹿児島県鹿児島市)

4. 金城和俊: 「マングローブ林でと海の繋がり」第62回日本生態学会大会自由集会 MAFES 「マングローブ林での土壌圏炭素動態」, 2015年3月21日, 鹿児島大学 (鹿児島県鹿児島市)

5. 木田森丸, 真木謙造, 加藤拓, 飯村康夫, 金城和俊, 大塚俊之, 藤嶽暢英: 石垣島吹通川のマングローブ域における溶存有機物の特性把握. 日本陸水学会近畿支部会 第26回研究発表会, 2015年3月7日, 京都大学 (京都府京都市)

6. 木田森丸, 真木謙造, 津田久美子, 早川和秀, 杉山裕子, 川東正幸, 大塚俊之, 加藤拓, 藤嶽暢英: 湖沼や河川水の腐植物質含量はどのくらいを占めるか. 日本腐植物質学会, 2013年11月21-22日, 佐賀大学 (佐賀県佐

賀市)

7. 金城和俊・具志堅素紀・森田沙綾香・平舘俊太郎: マングローブ林内の炭素組成, 日本土壌肥料学会 2013年9月11-13日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)

8. 金城和俊・屋宜遥穂: 国頭マージにおける土粒子の分散および凝集に与える土壌理化学性, 日本土壌肥料学会九州支部会, 2013年4月22-23日 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)

9. 藤嶽暢英: フミン物質の化学構造特性とその多様性, シンポジウム「腐植物質から環境を読む」日本腐植物質学会, 2012年11月21-22日, 首都大学東京 (東京都八王子市)

10. 藤嶽暢英, 飯村康夫: 土壌有機物の特性からみた炭素賦存量評価に向けた課題, シンポジウムIII「日本の炭素賦存量を量・質の両面から考える」日本土壌肥料学会, 2012年5月20日, 鳥取大学 (鳥取県鳥取市)

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
大塚 俊之 (Toshiyuki Ohtsuka)  
岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授  
研究者番号: 90272351

(2) 研究分担者  
藤嶽 暢英 (Nobuhide Fujitake)  
神戸大学・(連合) 農学研究科 (研究院)・教授  
研究者番号: 50243332

(3) 連携研究者  
金城 和俊 (Kazutoshi Kinjo)  
琉球大学・農学部・准教授  
研究者番号: 30582035