

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14328

研究課題名(和文) 脂肪酸バイオマーカーを用いた海草起源の埋没する炭素の検出および定量化手法開発

研究課題名(英文) Development of quantification method of buried carbon derived from seaweed using fatty acid biomarker

研究代表者

西村 修 (NISHIMURA, Osamu)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：80208214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：海洋植物起源有機炭素が実水域において数千年を経てどれだけ残存するのかわかっていない。本研究では植物起源有機炭素残存率の推定を目的として、小川原湖の堆積物コアサンプルの脂肪酸を分析し、約9,000年前の層から植物のバイオマーカー脂肪酸LCFAsを検出した。さらに脂肪酸C26:0の炭素安定同位体比を用いて有機炭素を海起源と陸起源に分離した。なお、陸上植物はマコモ、海洋植物はアマモで代表させた。その結果、推定された海洋植物の有機炭素残存率は既往の研究で推定された残存率(40%)と近い値を示し、堆積物の脂肪酸炭素安定同位体比分析から海草起源の埋没する炭素量を明らかにできる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：It is unclear how much marine plant-derived organic carbon remains in the actual waters after thousands of years. In this study, fatty acids in the core sample of sediments of Lake Ogawara was analyzed for the purpose of estimating the residual ratio of higher plant-derived organic carbon. LCFAs, biomarker fatty acids of plants, were detected in the sedimentary layer about 9000 years ago. In addition, carbon isotopic ratio of fatty acid C26:0 was used to separate organic carbon into marine and terrestrial origins. Here, the terrestrial and marine plants were represented by Manchurian wild rice and eelgrass, respectively. As a result, the estimated residual organic carbon content of the marine plant was close to the estimated residual rate of 40% in the previous study. This result suggests that carbon stable isotopic analysis of fatty acids in sediments can reveal buried carbon content from seaweed.

研究分野：環境生態工学

キーワード：ブルーカーボン

1. 研究開始当初の背景

米航空宇宙局(NASA)は2018年1月に、2017年は記録上2番目に熱い年であり、さらにエルニーニョ等の自然現象の要因を除くと最も暑い年だったと発表した¹⁾。その支配的な原因である可能性が“極めて高い”とされているのは、人為間活動から発生する温室効果ガスである²⁾ 二酸化炭素は18世紀後半から現在までの約200年間に約60ppmの上昇³⁾が見られており、大気中濃度は少なくとも過去約80万年間で前例のない水準となっている。

ところで、光合成により固定され、自然生態系の植物および土壌に貯留される炭素(グリーンカーボン)のうち、海洋生態系に捕捉される炭素はブルーカーボンと呼ばれる⁴⁾。

こうした自然生態系による炭素固定は、大気中の温室効果ガス削減に寄与すると考えられている。しかし、これまで国際的に議論されてきたのは陸上植物による炭素固定能力が中心で、ブルーカーボンの定量的評価については研究段階にある。

沿岸海域における海草・海藻による炭素固定の知見は少ないが、既往の研究⁵⁾から伊勢湾に存在する2haのアマモ場は0.92t/yearの炭素を生物体として固定していることが示されている。また、海藻アオサ、アカモク、マクサと海草アマモ由来の溶存態有機炭素の室内分解実験から、アマモ由来有機炭素は海藻由来より残留しやすいことが示された⁶⁾。Mateo⁷⁾らは地中海にて海草 *Posidonia oceanica* が形成する堆積層の炭素年代調査から3,370年前の有機炭素を検出し、海草由来であることを示唆している。同様の研究⁸⁾は瀬戸内海でも行われており、約4,000年前の堆積層からアマモのDNAバイオマーカーが発見され、海草由来有機炭素の一部は分解されずに長期間残存する可能性が示されている。

これらの研究より海草・海藻を起源として数千年にわたって堆積し続ける有機炭素(いわゆる埋没する有機炭素)の存在は明らかになりつつある。しかし、埋没する有機炭素が、どの程度の量として見積もれるのか、結果として地球温暖化の緩和策として位置付けられるのかについては未知である。

2. 研究の目的

本研究では海草・海藻が生物分解を受けてなお長期的に残存する有機炭素(埋没する炭素)の量を推定することを目的とする。このため、海草・海藻の室内分解実験を行い、分解過程をモデル化して埋没する炭素を理論的に求めた。また、青森県小川原湖の底質コアサンプルを分析し、実水域において堆積している植物由来の有機炭素を検出した。そして、アマモ等の海洋植物由来の埋没する有機炭素の割合の推定を試みた。

3. 研究の方法

(1)室内分解実験

松島湾桂島にて採取した海草アマモ (*Zostera marina*)と褐藻アカモク(*Sargassum horneri*)を用いて生物分解実験を行なった。採取したアマモ、アカモクは凍結乾燥後粉末化して実験に供した。実験に用いた海水は松島湾で採取したものをあらかじめガラス繊維ろ紙 GF/B(孔径1 μ m)でろ過し、粗大な有機物等を除去した。

100mL フラスコに海草・海藻の乾燥粉末試料1000mg、海水40mLを入れ、20℃で暗条件の恒温室内に設置した。回転数100 rpmのシェイカーでフラスコを攪拌して好気条件を保ち、分解実験開始から0, 4, 7, 15, 31, 45, 61, 153, 183, 360, 540, 720日後に一部のフラスコを取り出し分析に供した。

フラスコの中身を取り出し GF/B を用いてろ過を行い、凍結乾燥処理を行った後にろ紙上の懸濁物の質量を測定し、FLASH2000(Thermo)を用いて有機炭素を、Abdulkadir.S. and Tsuchiya⁹⁾の方法により脂肪酸抽出した試料をキャピラリーカラム Select FAME(Agilent, 内径0.25mm, 膜厚0.25 μ m, 長さ100m)を装填したガスクロマトグラフ GC-2014(SHIMADZU)で分析した。

(2)小川原湖底質コアの分析

青森県小川原湖内で採取された底質コアサンプルを深さ方向に分割して切り出し、分析に供した。脂肪酸の安定同位体比分析の結果を解析するために、松島湾周辺で採取したアマモとマツ、伊豆沼で採取したハス、マコモ、ヨシの5種類の植物の分析も行なった。

脂肪酸の炭素安定同位体比分析については脂肪酸分析で用いた5種類の植物と小川原湖の堆積物コアサンプルからいくつかの層を取り出したものをサンプルとして、ガスクロマトグラフ/同位体比質量分析計を用いて分析を行った。

各脂肪酸中 ¹³C 分析には前処理装置として脂肪酸組成分析と同じキャピラリーカラムを充填したガスクロマトグラフ(TRACE GC Ultra, Thermo Fisher Scientific 社製)と連結した同位体比質量分析計(Delta-V advantage, Thermo Fisher Scientific 社製)を用いて分析した。

以上の分析結果を利用して、陸上植物の代表をマコモ、海洋植物の代表をアマモと仮定し、最もピークが出たC26:0の炭素安定同位体比から堆積物の起源の割合を推定した。

(3)分解過程のモデル化

植物は3段階の分解過程が存在するとの報告¹⁰⁾より、(1)式のような3つの項を持つ Multi-G モデル¹¹⁾を用いて分解過程をモデル化した。Multi-G モデルは易分解性有機炭素の割合を示す G_1 、準難分解性有機炭素の割合を示す G_2 、難分解性有機炭素の割合を示す G_{NR} に分画し、それぞれの物質が異なる速度の一次反応で分解されることを仮定した式であ

る．本研究では試料の粉末化の過程で細胞壁が壊れ，溶脱により減少する有機炭素を G_1 の項で表される易分解性の有機炭素と仮定し，(2)式のように簡略化した．そして G_2 で表される準難分解性有機炭素と G_{NR} で表される難分解性有機炭素について実験結果を用いて Multi-G モデルで推定し，(3)式のように全体から G_2, G_{NR} の値を差し引くことで G_1 の値を求めた．また，準難分解性有機炭素の 99% が分解される時間を分解時間とした．

$$G_t = G_1 \exp(-k_1 t) + G_2 \exp(-k_2 t) + G_{NR} \quad (1)$$

$$G_t = G_2 \exp(-k_2 t) + G_{NR} \quad (2)$$

$$G_t = 100 - (G_2 + G_{NR}) \quad (3)$$

G_t : t 日後に残存している POC 割合 (%)

G_1 : 易分解性 POC (%) , G_2 : 準難分解性 POC (%)

G_{NR} : 難分解性 POC (%) , t : 分解時間 (日)

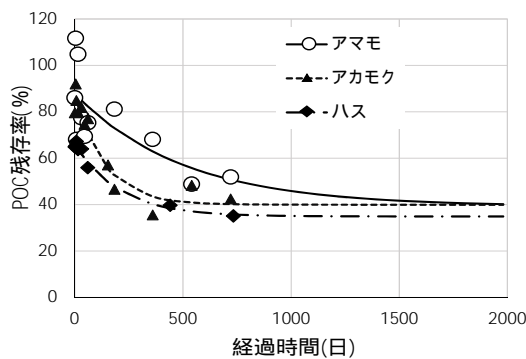
k_1 : 易分解性 POC の分解速度定数 (1/日)

k_2 : 準難分解性 POC の分解速度定数 (1/日)

4. 研究成果

(1) 分解実験における有機炭素の経時変化

系作成後からのアマモ・アカモク由来有機炭素残存率の経時変化とそれを元に Multi-G モデルで近似した分解曲線，ならびに既往の研究¹²⁾によって明らかにされた同一の条件下で推定されたハス (*Nelumbo nucifera*) の分解モデルを図 1 に示す．どの系でも POC は系作成直後に溶脱が原因とみられる減少が起こり，アマモは 13.8%，アカモクは 8.0% の減少が生じた．アマモの 153 日目において値が上昇しているが，この原因は不明である．しかしながら分解期間全体としては概ね減少しており，時間経過によって POC が分解していることが確認された．720 日にわたる微生物分解を受けてもアマモで 51.8%，アカモクで 42.5% の有機炭素が残存する結果となった．



(2) 有機炭素残存率の推定

Multi-G モデルの各係数について表 1 に示す．易分解性 POC の割合を表す係数である G_1 は，陸域の湖沼に生育するハスは沿岸海域に生育する植物に比べて大きい結果を示した．本研究において G_1 は溶脱による有機炭素の減少分とした．これは有機炭素の分解ではなく水溶性化を意味している．ハスは常に水中にある海草・海藻と比べ，水溶性有機物を多

	G_1 (%)	G_2 (%)	G_{NR} (%)	K_2 (1/日)	決定係数	分解時間(日)
アマモ	12.2	48.5	39.3	0.0020	0.531	2303
アカモク	12.3	47.7	40.0	0.0072	0.921	640
ハス	33.8	31.3	35.0	0.0049	0.983	940

く含むことが理由と考えられる．

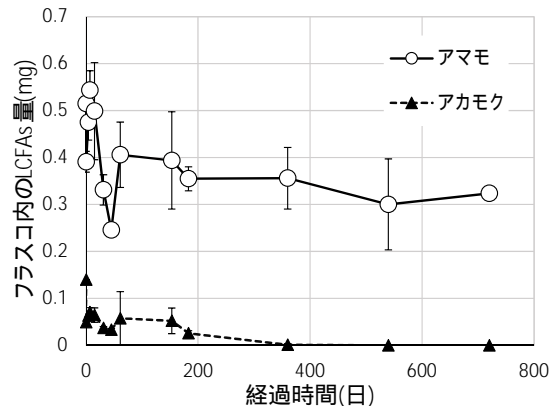
次に，アマモとアカモクの G_1, G_2, G_{NR} に大きな違いは見られなかった．アマモとアカモクの G_2 の値はハスより 15% 程度大きくなったが，ハスの葉部は水上に出ており，浮力が働く水中に成育する海草・海藻と異なり，その個体を支持するためにセルロースやリグニンといった難分解性の有機物を含む細胞壁^{13,14)}を増大させたことが原因と推測される．

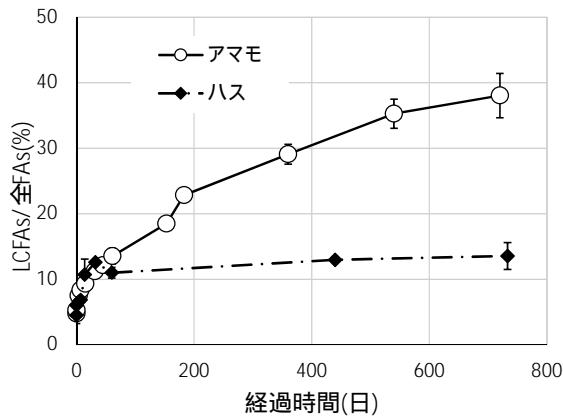
最終的に残存する有機炭素である G_{NR} はアマモで 39.3%，アカモクで 40.0% となり，ハスの 35.0% と比べ海洋植物は残存する量が多かった．アマモ，アカモク共に，枯死した草体に含まれる有機炭素の 4 割程度を埋没させる結果となり，海草・海藻の生産は大気から海洋への炭素固定に少なからず寄与していることが明らかになった．

次に，準難分解性有機炭素の生物分解が 99% 完了する時間を推定すると，アマモは 2303 日，アカモクは 640 日となった．これは Ivan らの微生物は約 1 年で植物由来の準難分解性有機物を分解するという報告¹⁰⁾と異なるが，Ivan らは実水域にリターバッグを沈めて実験を行っており，2×4mm のリターバッグの孔を通り抜ける程度に細分化した有機炭素は分解されたとみなしている．そのため孔径 1 μm 以上を懸濁物とみなす本研究とは分解の定義が異なり，分解時間に差異が生じたと考えられた．

(3) 脂肪酸の経時変化

脂肪酸の中でも比較的難分解性と言われている炭素数 24 以上の長鎖脂肪酸 (LCFAs) の総量の経時変化を図 2 に示す．LCFAs はアカモクよりもアマモに含まれる量が多かった．720 日経過後アカモクの系で LCFAs は検出されなかったものの，アマモに含まれる LCFAs は残存し，経時的な減少もわずかであ





ることが示された。

アマモとハスの全脂肪酸に対する LCFAs の割合(以下:LCFAs/全 FAs)の変化を図 3 に示す。LCFAs/全 FAs は時間とともに上昇し、分解の進行の指標になることが示唆されている¹²⁾。本研究においてもアマモの LCFAs/全 FAs は分解の進行に伴って上昇した。これは LCFA 以外の脂肪酸の分解が進んでいるためである。

(4)底質コアサンプル中に残存する海草・海藻由来有機炭素の推定

堆積物の炭素安定同位体比から海洋植物と陸上植物の起源の割合を推定した結果を図 4 に示す。堆積物起源の割合は各層で大きく異なり 5~68%の範囲にあった。この割合および LCFAs 量を用いて、初期アマモ由来有機炭素量を推定し、残存有機炭素量で除することで有機炭素残存率を計算した。それをアマモの有機炭素残存モデル¹⁵⁾と比較したものが図 5 である。既往の研究では最終的なアマモの有機炭素残存率は 39.3%と予測されていたが、今回算出した残存率は約 24~51%の範囲にあり、モデルと近い値を示した。これにより、720 日にわたる実験の結果を近似した既存のアマモの Multi-G モデルは、実水域での残存率と近い値になっており、十分な推測ができていた可能性が示された。

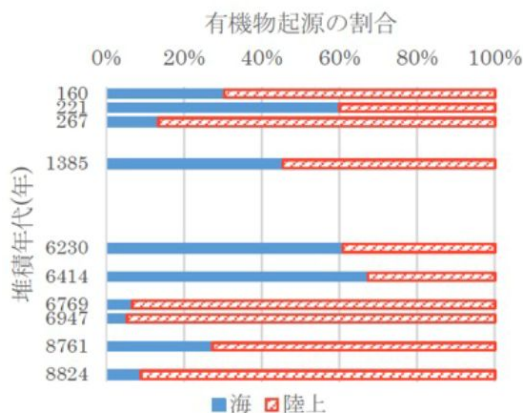


図 4 堆積有機物の起源割合

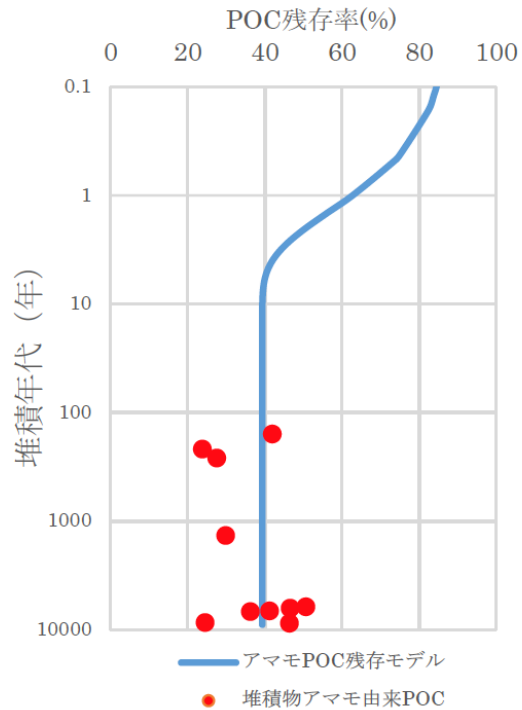


図 5 堆積物コアサンプルにおけるアマモ由来有機炭素残存率の鉛直分布

<参考文献>

- 1) NASA and NOAA : Long-Term Warming Trend Continued in 2017 , [https://www.nasa.gov/press-release/long-term-warming-trend-continued-in-2017-nasa-noaa] (参照 2018/2/4)
- 2) IPCC : Fifth Assessment Report , 2014
- 3) 気象庁 HP : 二酸化炭素濃度の経年変化 , [http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html] (参照 2018/2/4)
- 4) UNEP, BLUE CARBON, 2009.
- 5) 国分秀樹, 山田造且, 第 48 回日本水環境学会年会講演集, p.36, 2013.
- 6) 鈴江真由子, 東京大学修士論文要旨, 2008.
- 7) M. A. Mateo, J. Romero *et al.*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44, pp.103-110, 1997.
- 8) 独立行政法人水産総合研究センター, 国立大学法人東京大学大気・海洋研究所, 「藻場, 干潟の炭素吸収源評価と吸収機能向上技術の開発」報告書, 2011.
- 9) Abdulkadir, S. and Tsuchiya, M., *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 354, pp.1-8, 2008.
- 10) Ivan, V., John *et al.*, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 89, pp.29-54, 1985.
- 11) Westrich, T. J. and Berner, R. A., *Limnol. Oceanogr.*, 29(2), pp.236-249, 1984.
- 12) 千葉高之, 東北大学修士論文, 2015.
- 13) 富吉啓太, 松石貴裕, 尾崎行生, 九大農学芸誌, 第 68 巻, 第 2 号, pp.19-24, 2013.

14)谷沙柄里,第25回廃棄物資源循環学会研究発表会,講演原稿2014,pp.297-298,2014.
15)物井健太郎,東北大学修士論文,2017.

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 0件)

〔学会発表〕(計 4件)

高橋菜摘,千葉周作,丸尾知佳子,西村修,坂巻隆史,野村宗弘,ブルーカーボン評価のための堆積物コアサンプルの成分解析,平成29年度土木学会東北支部技術研究発表会, VII-25, 2018.

物井健太郎,丸尾知佳子,野村宗弘,西村修,長期分解実験による底質への植物由来有機炭素固定量の評価,第51回本水環境学会年会講演要旨集,p.18,2016.

物井健太郎,西村修,野村宗弘,分解モデルを用いた海域への海草由来炭素固定量の推定,日本水処理学会誌別巻,36,p.45,2016.

物井健太郎,野村宗弘,西村修,アマモ等水生植物由来有機炭素の分解モデル,汽水域研究会2016年(第8回)大会講演要旨集,pp.34-35,2016.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

西村 修(NISHIMURA, Osamu)
東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号:80208214

(2)研究分担者

野村 宗弘(NOMURA, Munehiro)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号:70359537

(3)連携研究者

()

研究者番号:

(4)研究協力者

丸尾 知佳子(MARUO, Chikako)
東北大学・工学部・工学研究科技術部・主任