

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12295

研究課題名（和文）海洋への炭素固定量増加に寄与する海草藻類の難分解成分蓄積の環境応答性の解明

研究課題名（英文）Environmental factors controlling accumulation of refractory components of macrophyte contributing to an increase of carbon sequestration to the ocean

研究代表者

梅澤 有 (UMEZAWA, Yu)

東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・准教授

研究者番号：50442538

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ブルーカーボンが着目されているが、様々な海洋環境の下、海草藻類の種に応じた生産量、および、生産された有機物の分解特性、についての知見は限られている。本研究では、 ^{13}C 法によるホンダワラの葉・茎の部位別生産量測定により、総生産による炭素固定量の精緻化に寄与した。また、海藻類の種類や部位によって忌避物質の含量が異なることや、アマモの窒素含量と忌避物質の1つであるフェノール量に負の相関関係があることを明らかにした。さらに、忌避物質の多い海草や褐藻類の分解培養実験から、構造物質に加え、忌避物質や窒素・リン量も分解特性を決める可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

COP21にて採択されたパリ協定では「温室効果ガスの削減に向けて、生態系吸収源の評価・利用」が明記されており、21世紀後半には、温室効果ガス排出量を生態系が吸収できる範囲に抑えることが掲げられた。国内でも、近年、「ブルーカーボン（海洋の生物が取り込む炭素）」の活用が着目され、2019年6月の閣議決定では、初めて明記されるに至っている。本研究の成果は、このブルーカーボンの価値の定量的評価に活用できるものであるほか、今後、海草藻場の造成を行っていく上での最適地（水産、環境、防災など様々な観点で）を探っていく際に、有用な科学的知見を提供する。

研究成果の概要（英文）：Carbon incorporated by macrophyte and sequestered in the ocean for a long period has been focused on as “blue carbon”. But there is limited knowledge on the primary production (PP) of each species of macroalgae and the decomposition characteristics of the newly produced organic matter under various marine environments. In this study, we accurately evaluated the gross PP by measuring the production of each part of the leaf and stem of *Sargassum* spp. using the ^{13}C method. We also measured the N content of eelgrass, (*Zostera marina*) leaves using a portable nitrogen meter and found a negative correlation between N content and the amount of phenol, one of the repellent substances. Furthermore, the incubation experiments of algal tissues with different amounts of repellent substances showed the possibility that the amounts of repellent substances, N&P, in addition to the amounts of structural substances, determine the decomposition characteristics of these plant-derived organic matter.

研究分野：生物地球化学

キーワード：海草藻類 生産量 構造物質 忌避物質 炭素固定 分解特性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2015年の国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）の締約国会議において採択されたパリ協定では、世界各国が温室効果ガスの排出削減に関して独自の緩和策を掲げ、相互に検証し合う仕組みが示され、「生態系によるCO₂ガス吸収源や炭素貯蔵庫の保全や強化」が明記された。日本国内では、グリーンカーボンと呼ばれる森林・農地管理による気候変動緩和技術に関する研究は進んでいるものの、海草藻場生態系に代表されるブルーカーボン（海洋生物によって海中に取り込まれる炭素）の活用を政策レベルに適用できるまでの知見が集積されていない。国内外の関連論文・資料を精査し、日本の浅海生態系（海草藻場や干潟）における年間CO₂ガス吸収量を全国推計した結果、技術介入による藻場生態系造成と適切な管理により、2030年には、204 - 910万トン/年のCO₂吸収量に増加させられることが見積もられている（桑江ほか, 2019）。これは、グリーンカーボンにおける農地の二酸化炭素吸収量に匹敵するが、海草藻場で生成される有機物の海洋環境に応じた分解特性など未解明な点が多く、この推計値には不明瞭な点が多い。

海草・藻類が固定する炭素のうち長期的に海洋に固定される有機物量を評価していくうえで、1)生産量の評価、2)生産された有機物が、その有機物の質や、海洋環境に応じてどのような分解特性を持つか、3)生産された有機物の海洋における輸送過程・場所、について科学的な知見を蓄積していく必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、海藻の総生産量（一次的な炭素吸収量）をより詳細に明らかにすること、窒素負荷などの環境勾配に応じた海草・海藻類の構造物質・忌避物質の変動を明らかにすること、海草・海藻由来有機物が、異なる海洋環境〔海底堆積物中（嫌気的高栄養）、深層海水中（好気的高栄養）、表層海水中（好気的低栄養）〕でどのように分解するか明らかにすること、を通し、海草・海藻による炭素固定のポテンシャルについての知見を集積していくことを目的とした。

3. 研究の方法

¹³C 標識法による部位別測定を用いたガラモ場の生産量評価

瀬戸内海の伊予灘北部に位置する山口県平郡島の周辺海域に生息するガラモ場にて調査を行った。調査地では水質データとして水温、塩分、栄養塩濃度、DIC濃度の測定の他、藻場の優占4種（アカモク、ジョロモク、ノコギリモク、ヤツマタモク）の現存量をコドラート法により、3種（2019年度；アカモク、ジョロモク、2021年度；ジョロモク、ノコギリモク）の生産量を¹³C標識法により測定した。2019年度は生産量測定用の試料として成長部（藻体上部）を使用し、2021年は部位別で生産量が異なることを考慮して、藻体を葉部、茎部、越年部に切り分けて測定用試料とした。また、¹³C標識法による生産量測定結果を用いた年間生産量の概算には、複数の光条件における生産量データが必要になるため、2021年9月、10月の調査では2種の光条件（自然光、弱光）を用意して生産量を測定した。

海域別の窒素負荷の違いが海草・海藻体中の化学組成と分解特性に与える影響評価

実験I. 「携帯式簡易窒素計を用いたアマモ葉中の窒素含有率およびクロロフィル濃度の推定」

葉中の窒素含有率は光合成効率だけでなくトレードオフや分解特性に関わる有用な測定項目であるため、現場で簡便な測定を実現することが望ましい。窒素供給環境が異なると予想され

る北海道厚岸湾(AK)および厚岸湖(CL・CK)のアマモ(*Zostera marina*)を実験対象として用い、葉身を部位別に複数の携帯式簡易窒素計を用いて測定した値と、同一箇所の窒素含有率およびクロフィル濃度の実測値を比較し、実測値の推定に利用可能な条件について考察した。

実験II. 「海草類・海藻類中の難分解性有機物の定量および定性評価」

木質資源科学分野や食品化学分野で使用される簡易定量法を用いることで、海草類アマモおよび海藻類コンブ目のクロメ(*Ecklonia kurome*)、カジメ(*Ecklonia cava*)、アラメ(*Eisenia bicyclis*)、およびヒバマタ目のアカモク(*Sargassum horneri*)、ジョロモク(*Myagropsis myagroides*)、ノコギリモク(*Sargassum macrocarpum*)中の構造的物質およびフェノール性忌避物質を種・部位毎に直接的かつ簡便に定量および定性評価し、難分解性有機物の組成と環境条件の関係について考察した。

実験III. 「実際の海洋環境を想定した分解培養実験」

実験Iおよび実験IIにて化学組成が明らかとなった試料を、藻場から流出した藻体が辿り着く代表的な海洋環境条件として堆積物中(嫌氣的・高栄養・攪乱なし)、外洋表層(好氣的・貧栄養・攪乱あり)、中深層(好氣的・高栄養・攪乱あり)を現場海水と再現したボトル内にて培養することにより、化学組成と環境条件の違いが分解特性に与える影響について考察した。

大型褐藻類の環境に応じた分解特性の評価

海中林を形成し藻場造成対象藻類の1つであるコンブ科褐藻類のカジメ(*Ecklonia cava*)に着目し、その近縁種であるアラメ(*Eisenia bicyclis*)と共に、部位毎にKOH処理、wise処理、NaOH処理を行って、セルロースを主体とする準難分解性物質の含量を測定比較した。その後、カジメについて現場海水を使用して分解培養実験を行った。分解条件は、離脱した海藻成分が流出し得る海域場の条件を想定し、海底堆積物中(嫌氣的高栄養)、深層海水中(好氣的高栄養)、表層海水中(好氣的低栄養)の3つに設定した。脱落枯死した藻体や水中に放出された溶存有機物の分解特性が、海域条件に応じて分解特性が異なるという仮説を検証するために、実験開始0、1、7、30、60日後の海水試料中の溶存有機態炭素・窒素(DOC・DON)・栄養塩濃度の分析、実験開始0、30、60日後の懸濁物や藻体の重量および炭素・窒素含量の分析をそれぞれ行った。

4. 研究成果

¹³C 標識法による部位別測定を用いたガラモ場の生産量評価

2019年度の調査対象地において最も優占していた大型褐藻類はジョロモクであり、9月、10月、12月、1月の現存量はそれぞれ、1984.8、3664.0、2958.4、303.3 wet-g/m²であった。

2019年度に¹³C標識法により測定したジョロモク成長部の生産量は9月、12月、1月において、それぞれ2.15、2.62、1.85 mgC/dry-g/hであった。また、2021年9月、10月では光量2条件、部位3条件にて生産量を測定し、ジョロモクの9月の自然光条件では葉部、茎部、越年部それぞれ1.93、0.73、0.10 mgC/dry-g/hであり、弱光量条件では葉部、茎部、越年部それぞれ1.64、0.48、0.10 mgC/dry-g/hであった。10月は自然光条件において葉部、茎部、越年部それぞれ5.08、1.24、0.21 mgC/dry-g/hであり、弱光量条件において葉部、茎部、越年部それぞれ4.30、1.49、0.20 mgC/dry-g/hであった。ジョロモクの部位別の生産量は葉部、茎部、越年部の順に高い傾向が確認された。

2021年の調査では、部位別の生産量と、藻体の部位別の湿重量割合を測定し、藻体全体の単位重量当たりの生産量を加重平均により求めた。この結果と2019年度に測定したジョロモクの成長部の生産量、2021年に測定したジョロモクの葉部の生産量を比較すると、ジョロモクの葉

部の生産量は他の2つの部位の生産量の2~3倍となった(図1)。成長部の藻体を用いた実験では、含まれる葉部と茎部の割合によって生産量が変動する可能性があることが示された。

現場海域において10時~16時の間で5時間の大型褐藻類の生産量を測定した結果から、2019年度における調査藻場の生産量を試算したところ、 1.65×10^6 mgC/m²となり、いくつかの課題点はあるが、¹³C 標識法による生産量測定から藻場全体の生産量を求めることができた。この値は、総生産量に近い値であり、本研究手法を用いた調査研究を積み上げていけば、沿岸域における炭素吸収量を正確に評価していくことが示された。

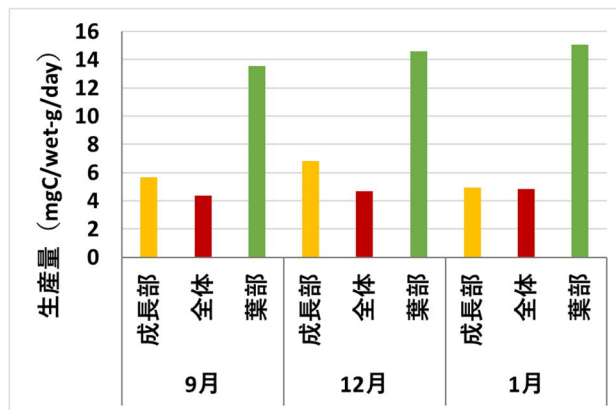


図1
ジョロモクの成長部、藻体全体、葉部の生産量比較

海域別の窒素負荷の違いが海草・海藻体中の化学組成と分解特性に与える影響評価

実験I：アマモ葉中の窒素含有率およびクロロフィル濃度は個々のアマモ場の窒素供給環境を反映しており、窒素負荷の強い内湾は外湾と比較して高い値を示した。SPAD-502による簡易測定値とクロロフィル濃度の実測値の決定係数、およびAGRIEXPERT PPW3000による推定値と窒素含有率の実測値の決定係数は高い値を示した。

実験II：海藻類の構造的物質は葉部に対して茎部の存在率が高いのに対し、フェノール類は茎部に対して葉部において豊富であった。よって同種においても部位毎に難分解性有機物の組成に大きな違いがあることを確認し、またこれらの組成は種間差も大きく、それぞれ異なる化学組成を有していることがわかった。海草類については、窒素負荷が大きい場所では、アマモ葉中のセルロース成分およびフェノール類は小さくなる関係を示す事例が確認された(図2)。

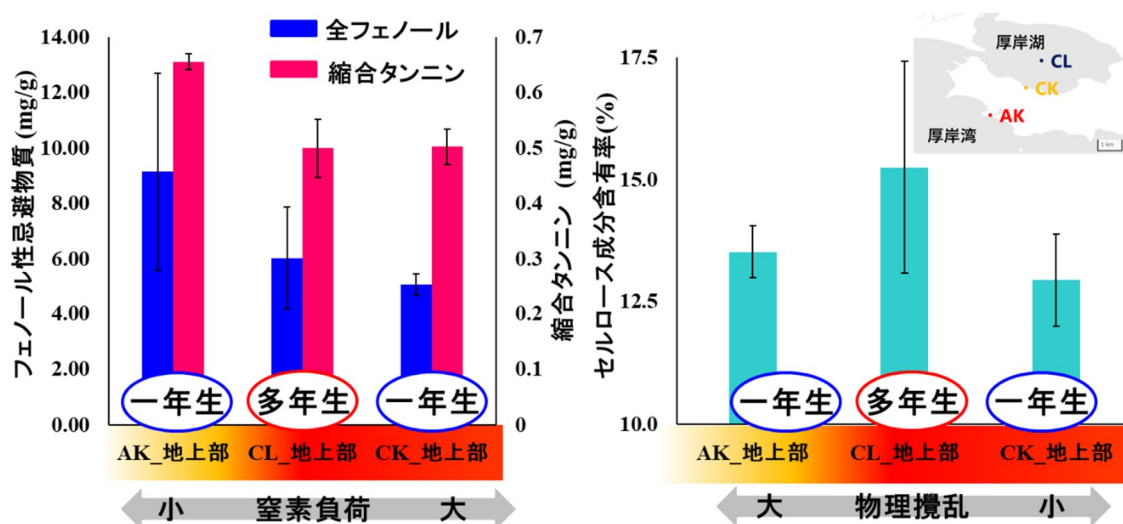


図2. 窒素供給環境および生活史の異なるアマモ地上部の
(a)フェノール性忌避物質と(b)構造的物質含有量

実験III：アマモの残存率は窒素負荷の強い地点ほど低下し、環境条件は嫌気的条件よりも好気的条件下において、低栄養条件よりも高栄養条件にて残存率は低下した。残存率の種間比較ではコンブ目はヒバマタ目と比較して低く、アマモが最も高い残存率を示した。

海草類アマモは陸上高等植物と同様に窒素負荷に対して環境応答を示し、窒素供給環境の違いは葉中の窒素含有率および難分解性有機物量に反映されることで、分解特性にも影響を及ぼすことが明らかとなった。実験Iの結果と合わせると、携帯式簡易窒素計による測定値からおおよその分解特性を推定できる可能性が示唆された。日本の内湾海域は、平均海水温、集水域からの栄養塩負荷量、海域地形に起因する海水交換量が大きく異なる。本研究の結果より、海草類・海藻類の分解特性は個々の海域ごとに大きく異なることが想定され、さらには沿岸域の海流や海底地形の違いから、流出した藻体が湾内部の海底下に蓄積されやすいか、外洋域の中深層域に速やかに移行されるかによっても異なると考えられる。今後ブルーカーボンの活用が本格化していく中で、一定面積当たりの炭素貯留機能を最大限まで引き上げた藻場を造成することは1つの観点であるが、その造成地点の選定に際して検討される環境条件として窒素供給環境は重要な要素の1つであり、本研究の成果はその評価基準に寄与する知見であると考えられる。

大型褐藻類の環境に応じた分解特性の評価

カジメとアラメを使用して化学処理を施して見積もった部位毎の準難分解物質の定量実験では、茎部は葉部に比べ、高い残存率を示した(図3)。

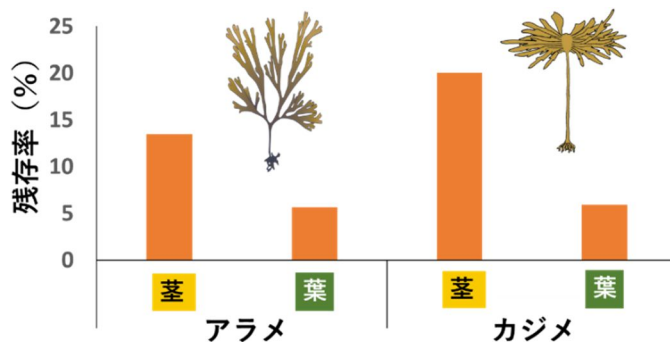


図3
アラメ・カジメの
準難分解性物質含率

分解培養実験において、30、60日後に行った藻体試料の乾重量には環境条件や部位毎の有意な違いは見られなかったが、残存する試料の形状から好気的かつ高栄養条件の葉部の分解が進んでいるものと思われた。微生物は海洋中で摂餌・増殖を行う際、分解基質でまかなえない窒素やリンを、海水中の栄養塩から取り込んでいるため、このような違いが生じたと考えられた。また、分解実験の進行に伴って水中に増加した懸濁物のCN比(5.5~7.5)は藻体のCN比(葉=10~13、茎=13~27)に比べて低く、微生物の寄与を反映しているものと考えられた(図4)。

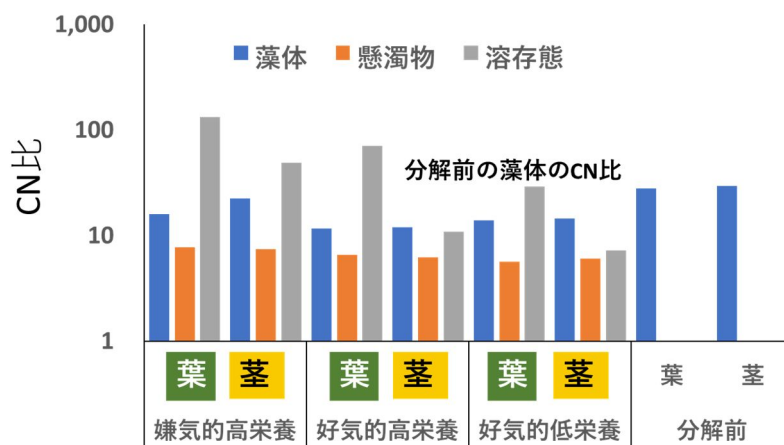


図4
60日後の藻体，懸濁物，溶存物質のCN比

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 桑江朝比呂・吉田吾郎・堀正和・渡辺謙太・棚谷灯子・岡田知也・梅澤有・佐々木淳	4. 巻 75
2. 論文標題 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2	6. 最初と最後の頁 10 - 20
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 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe, K., Yoshida, G., Hori, M., Umezawa, Y., Moki, H. and Kuwae, T.	4. 巻 17
2. 論文標題 Macroalgal metabolism and lateral carbon flows can create significant carbon sinks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 2425 - 2440
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/bg-17-2425-2020	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 角 美咲妃, 梅澤 有, 宮田 達, 劉 文, 堀川 祥生, 多羅尾 光徳, 小瀬 亮太, 桑江 朝比呂
2. 発表標題 セルラーゼ保有生物の存在下における準難分解性有機物の分解特性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮田 達, 梅澤 有, 井田 拓成, 堀川 祥生, 渡辺 誠, 和田 茂樹, 仲岡 雅裕, 桑江 朝比呂
2. 発表標題 窒素負荷の違いがアマモ (<i>Zostera marina</i>) の化学組成と分解特性に与える 影響評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田 達, 梅澤 有, 井田 拓成, 渡辺 誠, 伊豆田 猛, 桑江 朝比呂, 仲岡 雅裕
2. 発表標題 携帯式簡易窒素計を用いた <i>Zostera marina</i> 葉中の窒素含有率およびクロロフィル濃度の推定
3. 学会等名 日本サンゴ礁学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮田 達, 梅澤 有, 井田 拓成, 和田茂樹, 仲岡 雅裕, 堀川 祥生, 渡辺 誠, 桑江 朝比呂
2. 発表標題 海草・海藻類の準難分解性有機物の簡易定量評価
3. 学会等名 日本海洋学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井田拓成, 梅澤有, 宮田達, 渡辺謙太, 梶田淳, 真鍋康司, 吉田吾郎, 桑江朝比呂
2. 発表標題 瀬戸内海平郡島の周辺藻場における一次生産量の評価
3. 学会等名 日本海洋学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 林 健太郎・柴田 英昭・梅澤 有	4. 発行年 2021年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 181
3. 書名 図説 窒素と環境の科学	

1. 著者名 林 健太郎、柴田 英昭、梅澤 有	4. 発行年 2021年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 192
3. 書名 図説 窒素と環境の科学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 分担者	渡辺 誠 (WATANABE Makoto) (50612256)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授 (12605)	
研究 分担者	堀川 祥生 (HORIKAWA Yoshiki) (90637711)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授 (12605)	

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
---------	---------