

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23657011

研究課題名（和文） 光学新技術による海底の炭素貯留過程の評価：海草の地下部生産と分解の非破壊的測定

研究課題名（英文） Evaluation of carbon storage process into marine sediment based on new optical technology: non-destructive measurement of belowground production and degradation of seagrass

研究代表者

仲岡 雅裕 (NAKAOKA MASAHIRO)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授

研究者番号：90260520

研究成果の概要（和文）：光学的な生態系測定法をアマモ場に適用することにより、海草類の地下部の生産量・分解量を評価する方法を確立することを目的とする。屋内水槽実験により、細根の生物量は炭素シンクとしての寄与は無視できないことが判明した。また、可視～近赤外波長の分光画像撮影により、加齢は細根における可視波長反射率を低下させ、枯死は反射率を全体的に低下させることが明らかになった。分光反射率から根の齢、炭素、窒素量が12～37%の誤差推定可能であった。

研究成果の概要（英文）：This project aims to establish a method for quantitatively estimating production and degradation rate of belowground parts of seagrass by adopting non-destructive optical measurement techniques developed in terrestrial ecosystem research. Firstly, an aquaculture experiment of eelgrass was conducted using indoor and outdoor aquaria to periodically monitor growth of rhizomes and roots using an optical scanner in non-destructive manner. It was revealed that the root biomass accounted ca. 3 % of a total biomass of eelgrass, but the whole belowground parts occupied 14% and contributed significantly as a sink of carbon in sediment. Secondly, hyper spectral reflectance images of different-aged belowground parts of seagrass were captured at visible and near-infrared spectral region (446-894nm). The increase in age from 14-220 days reduced the reflectance of live fine roots mainly at visible spectral region. The dead seagrass parts showed low reflectance at whole spectral region. By developing the estimation model, root age and concentrations of carbon and nitrogen were predicted by the spectral reflectance at the error of 12-37% (rRMSE). In conclusion, it was shown that seagrass belowground production has clear seasonal cycle and contributes to blue carbon storage. It was firstly demonstrated that age of belowground parts, carbon and nitrogen balance can be determined non-destructively using spectral reflectance images.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：基礎生物学、生態・環境

キーワード：光学センサー、アマモ場、炭素吸収能、細根生産量、有機物分解

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に代表される気候変動に対する影響評価・適応策の策定の観点から、海洋における二酸化炭素吸収量を評価することは極めて重要である。アマモ類は海に生息する種子植物であり、その群生地である「アマモ場」は、高い純一次生産量を示すとともに、多様な動物の生息場所として、沿岸生態系において重要な役割を担っている。

アマモ場の生産量を評価することは炭素固定能のみならず、アマモ場における物質循環プロセスの解明のためにも重要であるが、従来の方法では、地上部（葉）、地下茎および主根（直径 1mm 以上の太い根）の純一次生産量に関する評価はされてきたものの、細根（直径 1mm 以下）の生産量は全く無視されてきた。また、細根はすみやかに分解されるため、海底への炭素貯留の主要な供給源として重要な役割を担っていると考えられるが、従来の方法では、分解物の測定は海底の堆積物を採集・抽出して化学的に計測する方法しかなく、海底を著しく攪乱することから、限定的にしか利用できなかった。この問題を解決する方法の一つとして、陸上生態系の一次生産評価において現在発達しつつある光学的手法を用いた非破壊的計測方法を確立することが有効であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、最先端の光学技術を用いた現地測定と栽培実験により、海草類の細根の生産量・枯死量、枯死した植物体の分解過程を、海底を攪乱せずに正確に測定する方法を開発し、沿岸生態系の炭素貯留プロセスに対するアマモ場および海草類の貢献を定量的に評価するために資することを目的とする。具体的には、屋外水槽実験設備、および野外のアマモ場において、光学スキャナーを用いて細根の成長・枯死・分解プロセスを連続的に測定する方法を開発し、炭素貯留に対する海草の細根の貢献を明らかにする。また、近赤外カメラを用いてアマモ地下部の光学反応の測定を栽培水槽を用いて連続的に行うことにより、海草地下部の枯死に伴う分解プロセスを定量的に把握する方法を開発する。以上の成果を元に、アマモ場の炭素循環過程および貯留率の正確な評価に結び付く新技術を確立する。

## 3. 研究の方法

### (1) 光学スキャナーを用いた海草の地下部の生産量・枯死量の評価方法の開発

厚岸湾および厚岸湖のアマモを研究対象とした。まず、野外におけるアマモ地下部の形態および量について、底質条件の異なる厚岸湾奥部真龍干潟（砂底）、および厚岸湖北

部のホロニタイ海域の潮間帯（泥底）で比較観察した（図 1）。

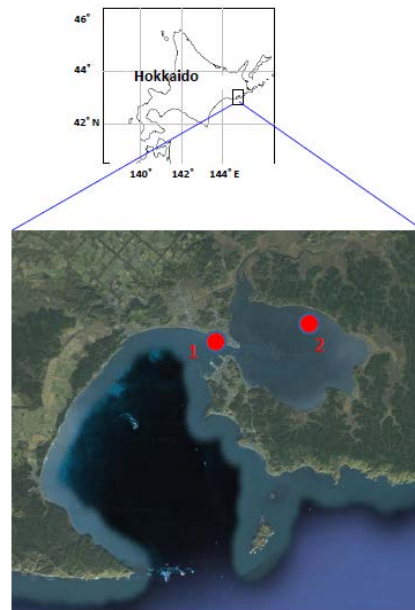


図 1. 調査地点の地図。1: 厚岸湾真龍干潟、2: 厚岸湖ホロニタイ海域のアマモ場。

次に、厚岸臨海実験所に設置した屋内水槽および屋外水槽を用いて、アマモの長期培養を行い、地下茎および根の成長過程の光学的測定法を行った。アマモは 2011 年 7 月および 2012 年 5 月に厚岸湾真龍干潟で採集したものを利用した。シュートごとに幅 30cm、深さ 20cm、厚さ 1.4cm（小型シュート）、もしくは 1.9cm（大型シュート）の亚克力製の水槽に植え付けた。底質には現地で採集し一度乾燥させた泥、および平均粒径が 0.105~0.125 mm のガラスビーズを利用した。飼育中は地下部に光が当たらないように黒い覆いをした水槽を流水条件に設置し、2~4 週間隔で、光学スキャナー（エプソン社製、GT-S600）により、水槽側面から撮影することによりアマモ地下部の形態を記録した。得られた画像を解析することにより、アマモ地下部の現存量および成長量を評価した。細根の根長を画像計測ソフト・（アイエムソフト社製、Image Measure Ver 2.2）を測定し、測定日ごとの根長変化を評価した。各測定間隔ごとに新たに出現した細根の長さおよび伸長した長さを合計したものを細根生産量とした。また細根枯死量評価のために根色変化および消失時期を記録した。

さらに、飼育開始から 2 か月後と 5 か月後には水槽の一部を取り出して、アマモ地下部（地下茎および根）および周辺部分の底質の採集を行った。これらは凍結乾燥した後、

CHNS 分析計(Perkin Elmer 社製, 2400 II)で炭素および窒素含有量を測定した。



図 2. 実験所水槽でのアマモ栽培風景

2012年5月～11月にかけては真龍のアマモ場で地下部の光学スキャナーを用いた地下部の非破壊的計測を試みた。大潮干潮時のアマモ場が干出しているときに、20cm 四方、深さ 30cm のアクリルボックスをアマモパッチの中央に埋設した(図3)。アクリルボックス壁面に見えるアマモ地下部の形態を1～2カ月の間隔で撮影した。現地ではまずアクリルボックス内の海水を抜いたあとに、ポータブル光学スキャナー(3R システム社製, 3R-HSA610)で壁面の画像を撮影した。



図 3. アマモ場での地下部の非破壊的画像観測のために設置されたアクリルボックス

(2) ハイパースペクトルカメラを用いた地下部組織の分解プロセスの測定法を開発

上記と同様の飼育培養実験系において、アマモ地下部の分解過程を追跡するために、生きた地下茎および根、それらの枯死体、およびアマモ周辺の底質について、可視～近赤外波長における連続分光反射率画像を撮影した。撮影後の組織に含まれている炭素や窒素濃度を実測し、生死や齢も含めて、それらを分光反射率から推定するモデルの作成を試みた。2012年6月に、アマモをサンプリングし、齢や生死ごとに単離した。人工光源のもとで、各組織の可視～近赤外連続分光反射率画像を近接撮影用に改造したハイパースペクトルカメラ(JFE テクノリサーチ製, ImSpector V10)を用いて撮影した(図4)。撮影後の組織は、脱塩、乾燥後、CN コーダー(SMIGRAPH 製 NC-900)により分析した。解析ソフトウェア(ERDAS IMAGINE 9.1)を用いて反射率画像から対象組織ごとの分光反射率の計算および抽出を行い、形質情報を推定するためのモデルを PLS 回帰によって計算した(Infometrix Pirouette 4.5)。

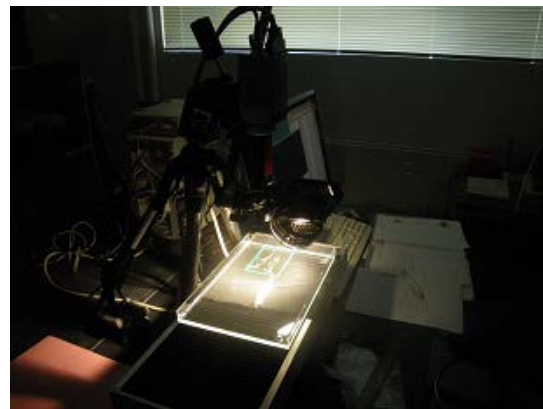


図 4. アマモ根組織の撮影風景

#### 4. 研究成果

(1) 光学スキャナーを用いた海草の地下部の生産量・枯死量を評価方法の開発

野外調査の結果、アマモの地下茎・根の量は底質により大きく異なることが判明した。特に、厚岸湾真龍干潟の根は、厚岸湖ホロニタイ海域のものよりも長く、現存量も多かった。この変異には底質の近い、および波浪による攪乱の強度の違いが関連していると思われる。すなわち、砂底である真龍干潟の方が、泥底の厚岸湖よりも地中の栄養塩量が少なく、その吸収のため地下部の生物量を増やす必要があること、また太平洋に直接面した厚岸湾の海域の方が攪乱強度が高いため、安定化のため地下部の生物量が高くなった可能性がある。本研究では地下茎および根の生物量が多い真龍干潟のアマモを利用して以



降の実験を行うこととした。

光学的な測定法は、水槽の形状および使用する底質の種類により大きな誤差が生じることが判明した。野外から採集した底質を利用した場合、水槽側面からのアマモ地下茎および根は判別が難しい場合が多かった（図 5 上）。一方、底質にガラスビーズを利用した場合は、地下茎および根の伸長状態および地下部周辺の底質の化学的変化を追跡することができた（図 5 下）。そこで、光学スキャナーによる地下部の季節変動の解析には底質にガラスビーズを入れた水槽を利用した。

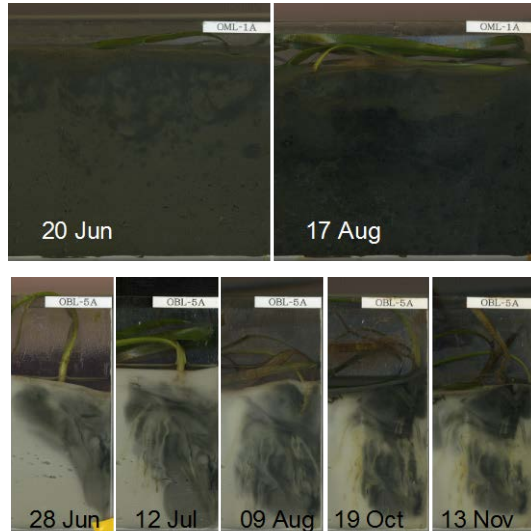


図 5. 光学スキャナーを用いて計測した栽培アマモ個体の地下部画像。(上) 泥栽培個体、(下) グラスビーズ栽培個体

細根根長は 6 月から 8 月に増加し（図 6）、また細根生産は生育期の 7 月～8 月に集中し、9 月以降はほとんど生産が行われていなかった（図 7）。また生育期に生産された根の多くは 11 月まで生き残っていた（図 8）。前年の観測結果を踏まえると、細根は 1 シーズン生存し、冬から翌年の生育期までの間に多くの根が枯死すると考えられた。また細根が現れた部分のビーズは黒色になり、根から炭素が移動していることが示唆された。一方、収穫個体の観測から、根は地下茎の節の部分から発生し、地下茎は節で区切られるノード単位で先端から枯死すること、そして枯死した地下茎部位から発生した根も枯死することが明らかとなった。現地で採取して得られたアマモバイオマスは  $161\text{g m}^{-2}$  あり、地下部バイオマスは全体の 14%、細根バイオマスは 3% であった。以上の結果から、アマモの地下部は地上部に比べてバイオマス量としては小さいものの、海底への炭素供給源として重要であることが示された。

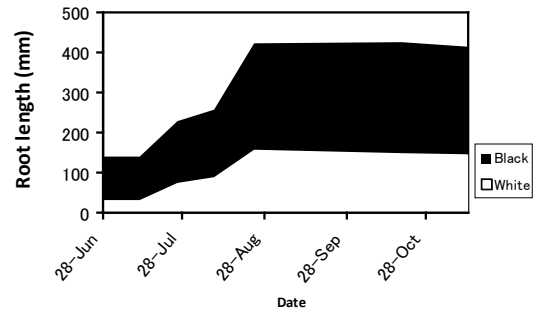


図 6. 栽培実験におけるアマモ根長の季節変化

アマモ場での地下部の非破壊的計測により、野外でのアマモ細根の画像観測に初めて成功した（図 9）。ただし、画像が得られたのはごく一部であり、経時変化を検出できるまでには至らなかった。これは第一に、野外のフィールドでは、波や潮流によりアクリルボックス外側の砂は絶えず攪乱を受けて動き、細根とアクリルボックスの間に砂が入り込んでしまうために細根が見えなくなったためと考えられた。またアクリルボックス内側からスキャンする方式をとったため、ボックスにたまった海水を排水して撮影した。そのため、観測できたのは干潮時のみとなり、観測頻度が制限された。今後は防水観測をする、潮流の影響を受けにくい形状のアクリル構造物を設置するなど改善の必要があると考えられた。

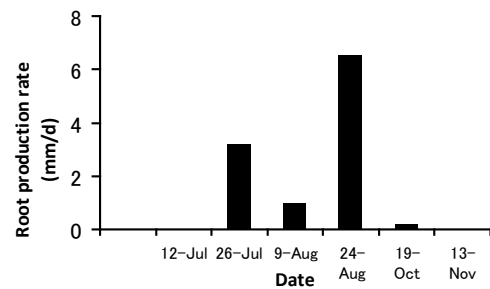


図 7. 栽培実験におけるアマモ細根生産速度の季節変化

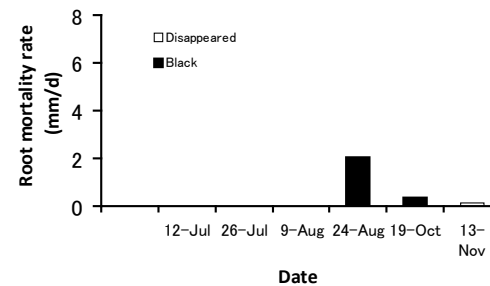


図 8. 栽培実験におけるアマモ細根の黒色化および消失（枯死）の季節変化

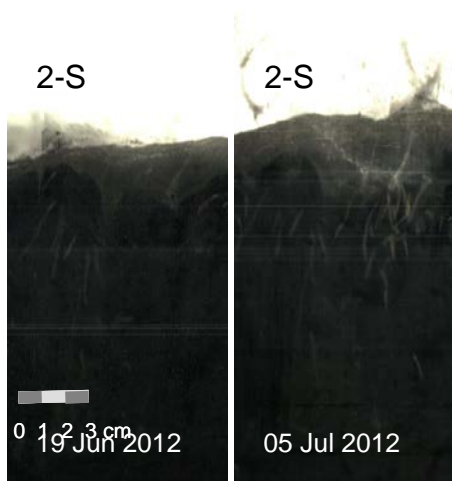


図 9. アマモ場での非破壊的計測により得られたアマモ細根画像

### (2) 分光画像による分解・発達過程の評価

アマモ地下部の枯死量の季節変化・空間変異に応じて異なる画像が撮影され、分解過程を評価するための光学的指標の作成が可能であることが判明した。底質の化学成分についての計測は継続中であるが、特に炭素量については地下部に空間的な不均一性があり、その変化速度が季節により大きく異なることが判明した。

異なる齢（日齢：約 14～220 日）および生死過程のアマモの根および地下茎を対象に可視～近赤外波長の分光画像を撮影したところ、根の加齢は可視波長の反射率差を低下させること、枯死は反射率を全体的に低下させることが明らかになった（図 10）。炭素含有量は生組織でほぼ一定だったが、窒素は若い根で含有量が多い傾向にあった（図 11）。PLS 回帰により分光反射率から根の齢、炭素、窒素量の推定を試みたところ、12～37%の誤差範囲でこれらの項目が推定可能となった（図 12）。この精度は陸上植物の根と大きな差異はなかった（中路ら,2012）。

### (3) 結論と今後の展望

本研究により、アマモの根の成長や動態は明確な季節性を持ち、ブルーカーボンとしての寄与を持つこと、その齢や炭素、窒素バランスの変化が分光反射率によって非破壊推定できることが海草において初めて明らかになった。

屋内水槽および野外における地下部の光学的測定においては、現場の底質そのものを利用した場合には、アマモ地下茎および根の識別が難しい場合が多く、今後の方法の更なる改善が必要となったが、グラスビーズを用

いた方法により、地下部の成長動態を詳細かつ非破壊的に追跡できる技術が確立した。今後は、異なる底質の媒体を用いることに伴う成長量・分解量の誤差について、より多数の地点のアマモを比較することで評価することが、本方法の汎用性を検討する上で重要であると考えられる。

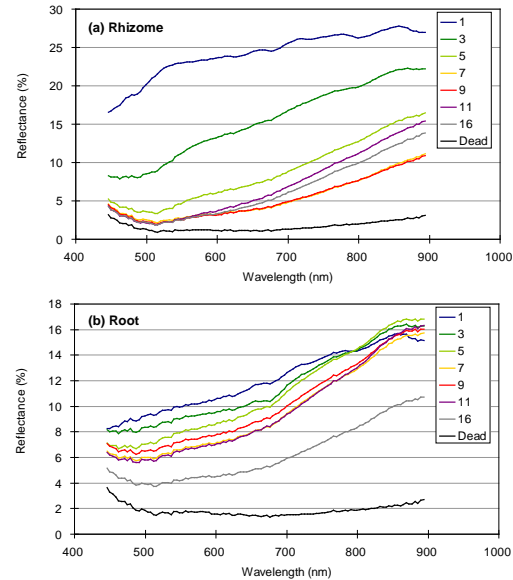


図 10. アマモの(a)地下茎および(b)根の連続分光反射率。凡例の数字はノードの番号を示し、14 をかけた値が日齢となる。

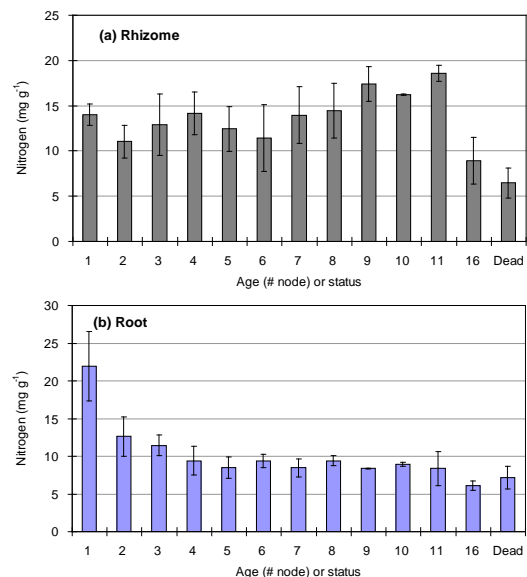


図 11. 各組織ごとの窒素濃度

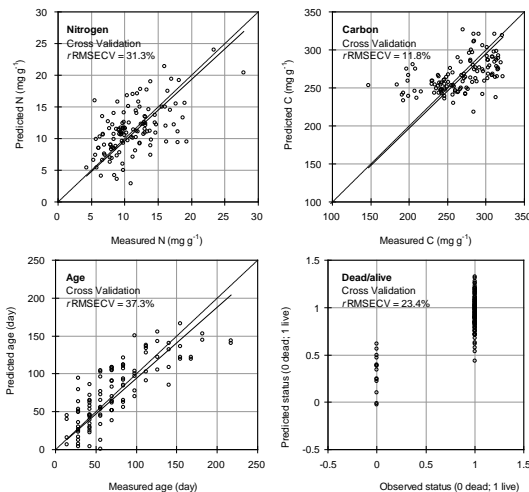


図 12. PLS モデルによる推定値と実測値の関係

分光画像を撮影することにより、アマモ地下部の成長量と分解率を陸上植物とほぼ同じ精度で推定できることが判明した。本方法についても、今後、異なる環境条件に生息する他地域のアマモ個体群および他の海草種で同様の測定をすることによりその汎用性を検証する意義は高い。また、アマモ枯死後の底質の分解プロセスについても今後光学的な解析を進めることが、アマモ場の炭素固定能のより正確な評価につながることを期待される。

## 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)

[学会発表] (計 1 件)

①福澤加里部, 仲岡雅裕, 中路達郎, 林奈津美(2012) スキャナを用いた海草・アマモの根の動態解析. 第 37 回根研究集会 2012 年 12 月 1 日, 京都大学 (京都市)

[図書] (計 3 件)

①Nakaoka, M., Lee, K-S., Huang, X., Almonte, T., Sidik Bujang, J., Kiswara, W., Ambo Rappe, R., Maryam Yaakub, S., Prabhakaran, M.P., Abu Hena M.K., Hori, M., Zhang, P., Prathep, A. and Fortes, M. D. (in press) Regional comparison of the ecosystem services from seagrass beds in Asia. In: (S. Nakano et al. eds.) AP-BON Book 2, Springer.

②Fukuzawa, K., Dannoura, M. and Shibata, H. (2012) Fine root dynamics and root respiration. In: Stefano Mancuso (eds) Measuring roots: An

updated approach. Springer-Verlag, pp. 395

③中路達郎, 野口亨太郎, 小熊宏之 (2012) 根圏動態研究における非破壊分光画像計測の可能性. In: 日本植物学会編 「植物科学の最前線」 SJ-Review, WEB 書籍 <http://bsj.or.jp/saizensen/> Vol 3, pp. 22-29.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

仲岡 雅裕 (NAKAOKA MASAHIRO)  
北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授  
研究者番号：90260520

### (2) 研究分担者

福澤 加里部(FUKUZAWA KARIBU)  
北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・助教  
研究者番号：10456824

中路 達郎(NAKAJI TATSURO)  
北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・助教  
研究者番号：40391130