

《 藻場における炭素固定機能について 》

Carbon-Fixation Functions in the Seaweed Beds

業務名	漁場の費用対効果分析基礎調査 (18-9140)
委託者	水産庁漁港漁場整備部
担当者	伊藤 靖, (中野喜央)

Of the carbon-fixation functions of the seaweed in the seaweed beds, (i) minimum standing stock, (ii) marine sediments, (iii) transport to offshore depth and (iv) refractory organic secretions were thought to contribute to the process of carbon-fixation in the long-run. When the existing quantitative data on the above 4 processes were collected and compiled, and provisional estimate for quantity of long-term carbon-fixation was made by the type of seaweed bed, eelgrass zone, sea oak/sea trumpet beds, ribbon weed bed and sargassum bed have respectively yielded annual rates of 0.10kg-C/m², 1.67kg-C/m², 0.13kg-C/m² and 0.60kg-C/m² in carbon-fixation. Such an approach, therefore, appears appropriate to quantitatively estimate the long-term rate of carbon-fixation in various types of seaweed beds.

Key words: seaweed bed, carbon-fixation, eelgrass zone

1. 調査の目的

水産基盤整備事業による藻場・干潟の造成、覆砂等は、本来の漁業生産向上効果のほか、環境保全機能として水質浄化効果、生物多様性の増加効果、炭素固定効果をもつと考えられる。しかし、現状の費用対効果分析において、環境保全機能で評価されるのは水質浄化効果のみであり、生物多様性の増加効果および炭素固定効果は定量化（貨幣化）ができないため評価されていない。そのため、事業の費用対効果（B/C）が低く見積もられる恐れがある。本論文は、藻場造成事業の便益をより適切に把握するために、炭素固定効果を定量的に算定する手法を検討したものである。

海藻草類は、生長に必要な炭素は周囲の海水中の二酸化炭素や重炭酸イオンを取り込むため、海藻草類が繁茂し形成する藻場は、二酸化炭素の吸収源になっているものと考えられる。しかし、海藻草類の寿命は一般に1年から数年であり、生長した藻体は枯死・脱落后、一部が分解し海水中に回帰するため、藻場による二酸化炭素の吸収効果を評価するためには、海藻草類の炭素循環の様々な経路を考え、長期的に固定される炭素量に着目した評価が必要である。そこで、本論文では、海藻草類の生活史や物質循環に関する既往の知見を整理し、藻場の炭素循環の様々な経路を考え、藻場による長期的な炭素固定に着目した二酸化炭素の吸収効果を検討した。

なお、藻場は海草藻場（アマモ場）と海藻藻場（アラメ・カジメ場、コンブ場、ガラモ場）に大別されるが、本報告では海草藻場を中心に紹介する。

2. 調査の内容と方法

本調査は、関連する既往知見を収集・整理することにより検討した。

3. 主な調査結果

3.1 藻場における炭素の循環と固定

(1) アマモ場における炭素循環の特徴

海草藻場は、九州以北においては主にアマモが、奄美諸島以南の南西諸島においてはリュウキュウスガモ、リュウキュウアマモなどが構成種となる。ここではアマモにより形成されるアマモ場の炭素循環過程をとりまとめた。

アマモは、軟底質の海底に生育し、種子による繁殖と地下茎の生長・分岐による繁殖を繰り返し、群落を拡大する。アマモは多年生であり、葉長は初夏に最大、秋季～冬季に最小となり、現存量もそれに応じて大きく変化する¹⁾。アマモ場における炭素循環の主な過程を図-1に示す。

- ア) 一次生産：光合成によって海草藻類が海水から二酸化炭素を吸収し、草体中に炭素同化する。アマモ場の炭素同化には、草体表面に付着する珪藻や藍藻などの藻類の光合成による炭素同化も加わる。
- イ) 分泌：草体内に同化した炭素は、一部が海草やそれに付着する藻類による分泌作用を通じて海水中に排出される。分泌物のうちフミン酸などの難分解とされる物質は長期的に海水中に滞留することになる。
- ウ) 呼吸：草体内に同化した炭素は、一部が呼吸によって二酸化炭素として海水中・大気中に放出される。
- エ) 摂餌・分解：草体内に同化した炭素は、植食性動物の摂餌によって動物体への蓄積を除き、呼吸を通じて二酸化炭素として海水中・大気中へ放出される。また、草体から離脱した葉や、枯死した地下茎や根の部分は、海洋微生物が体外に放出する酵素の作用を受けて、二酸化炭素として海水中・大気中へ回帰するが、一部は分解を受けずに海底に堆積する。
- オ) 脱落・流出：生産された草体は、脱落・流出によって海岸に漂着するものと、沖合の海洋中深層へ沈降するものがある。
- カ) 現存量：上記の生産量から分泌、呼吸・枯死、脱落・流出による喪失量を差し引いた残りが、草体としての現存量となっている。

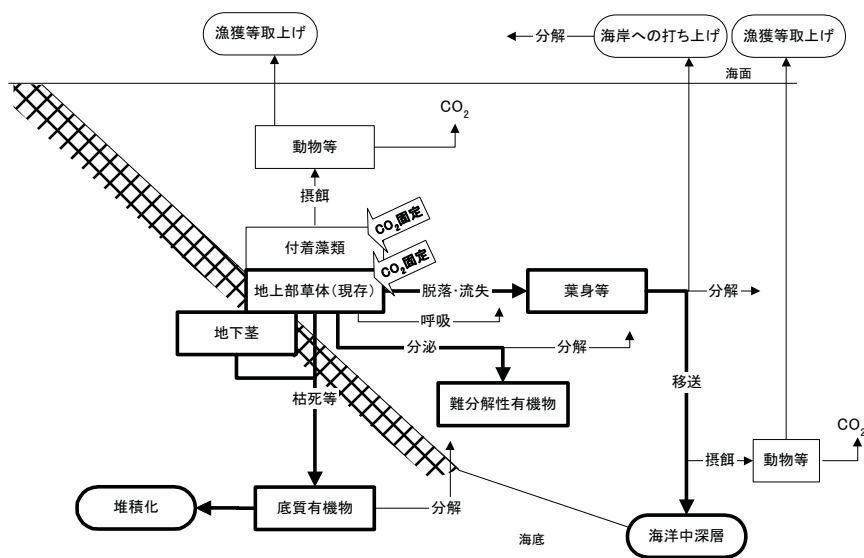


図-1 海草類藻場（アマモ場）における炭素循環過程

(2) 藻場における炭素固定に関する既往データ

藻場による炭素固定とは、海藻草類の光合成により固定された炭素のうち、海水中に長期間回帰しない過程にあたる。その量は、①固定された炭素のうち、藻体の脱落・流出や枯死、分解を受けずに常時生物体として保持される量（最小現存量）、②枯死・死骸となった後に分解されずに堆積物となり海底に固定される量、③脱落・流出により対象とする海域の沖側深層への移送により長期間貯留される量、④海藻草類が細胞外に分泌し

ている有機物のうち難分解性物質の量である。

炭素循環の各過程に関する既往データをもとに、炭素の長期的な固定に係わる、現存量、堆積、海洋中深層への流出、難分解性分泌物の量を整理した。なお、漁獲等水域外への取り出しについては、海域から炭素が除去されるものの長期的な効果には該当しないものと考えた。

①現存量の変化

アマモの現存量は、 $0.07\sim 1.0\text{kg-dw/m}^2$ とされている²⁾。季節的な消長については、天草富岡湾で地上部の現存量は概ね $0.05\sim 0.4\text{kg-dw/m}^2$ ³⁾、一色干潟では5月に最大で 0.6kg-dw/m^2 ⁴⁾以上である。

②海底への堆積

アマモは、地下茎と根部を持ち枯死後も堆積層に残る部分がある。また、葉部も分解し難い成分を含むことから、固定された炭素が比較的長期間残ると考えられる。海草に固定された炭素の16%がアマモ場の海底に堆積し⁵⁾、この分は炭素の除去に確実に貢献すると考えられている⁶⁾。

③沖合・海洋中深層への移送

アマモの葉長は初夏に最大、秋～冬季に最小となり、現存量もそれに応じて大きく変化する⁷⁾。枯死・脱落した葉体のうち一部は沖へ流失し、沖合の海洋中深層へ沈降する。アマモ1株当たりの重量で日消失率は1.4%である⁴⁾。実験水槽では、アマモが新しい葉を次々と形成する順次開葉型の植物であることが確認され、葉の脱落間隔は平均14日、葉の寿命は水温に依存し7～9月に30～40日、11～1月に80日以上である⁸⁾。

脱落したアマモの葉が沖合へ流出する量については、現時点では知見がないが、地形や流れの特性等によって海域ごとに大きく異なるものと考えられる。

④藻体から有機物として分泌される難分解物質

コンブ科やヒバマタ目等の褐藻類をはじめとする海藻類は、藻体から様々な有機物を細胞外分泌物として海中へ放出していることが知られている⁹⁾、¹⁰⁾。このような有機物の分泌量は総生産量の40%²⁾とされる。また、この内、難分解物質の割合については、直接的な知見は得られていない。

3.2 藻場による炭素固定量の試算

(1) 炭素固定量の試算の考え方

藻場による炭素固定量を求める方法には、現存する藻体に含まれる炭素量を算出する方法がある。この方法は、その場に現存する生物体を基本とするものであり、群落が生長する過程で枯死・脱落等により消失した固定量等が含まれないことから、飯泉⁶⁾や石岡ら¹¹⁾は、これを補正する考え方を下記のように提示している。

飯泉⁶⁾は、藻場の藻体全体としては生長しながらも個体としては脱落部分が多く、現存量(B)の何倍も生産量(P)があることを考慮し、この喪失量を補正するためP/B比を用いて、海藻による炭素固定量=(単位面積あたり現存量)×(P/B比)×(炭素含率)×(藻場面積)と算定している。また、石岡ら¹¹⁾は、藻場の年間定常の「現存量(最小現存量)」と海中に存在する「未分解藻片量」を評価している。

さらに、三上ら¹²⁾は、現存量に基づくP/B比は、目に見える新生物量のみを純生産量とみなすが、目に見えない溶存有機物として海水中に溶出する分を考慮すると、ガラモ場のP/B比は2～3倍程度大きくなるとしている。これらの算定は、いずれも海藻草類の生産量に着目した方法である。

ただし、生産で固定される炭素の多くは物質循環の過程で比較的短期間に海水中に回帰する。一方、常時生育する海藻草類は常時炭素を固定・貯留しているほか、枯死・脱落した葉体の一部は、海底への堆積や海洋中深層へ移送され、長期間固定されることになる。長期間固定される炭素は、大気中の炭素量を低下させることへ寄与し、大気保全の役割を果たしている。

本検討では、海草藻類による炭素固定量のうち長期間固定される量について検討した。本検討において炭素固定とする要素を図-2に示す。長期的な炭素固定量は、①炭素循環の過程で常時生物体に固定・貯留する量、②堆積物として海底に固定される量、③対象海域の沖合深所へ移送・隔離される量、④分泌される溶存有機物のうち難分解性物質の量で表す。

【炭素固定にかかる要素の考え方】

①現存量（最小現存量）

海藻藻類の現存量は、年間で大きく変動する。現存量のうち変動する部分は、魚介類の餌、枯死・脱落・分解、沖の中深層へ流出、漁獲に該当する。複数年にわたって変動しない現存量は、年間の最小現存量に相当する。この最小現存量は、定常的に炭素を固定していると考えられることから、大気保全への効果がある。現存量が最小となる時期の現地調査等から得られた現存量（乾重量）に炭素含有率 30%¹³⁾等に乗じて炭素量を求めた。

②藻場内での堆積

海藻類は多年にわたり生育し、地下茎や草体は分解しにくい部分を含んでいる。アマモの地下茎や草体が堆積して長期的に固定される割合を、アマモに固定される炭素の 16%⁵⁾として試算した。

③海洋中深層への移送

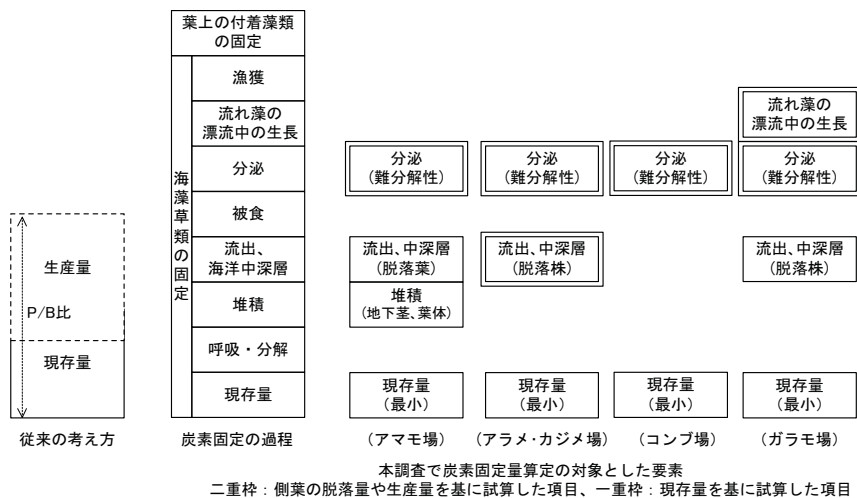
枯死・脱落した草体（葉体）のうちの一部は沖へ流出し、沖合の海洋中深層へ沈降することで、短期的な炭素循環の系外へ隔離される。海藻の葉身は水深 4,000～8,000mの深海でも数多く確認される²⁾。浅場で生育したツルアラメやホンダワラ類が荒天後に水深 150～200m付近で採取された事例がある¹⁴⁾。海藻藻類の種類によっては、脱落と枯死等の量が現存量に対して相当量になると考えられている¹⁵⁾。沿岸には水深数百mを超える海域が広く分布することから、大量に発生する流れ藻や寄り藻は、深海に向けてダイナミックに移動しているものと考えられている^{14,15)}。大陸棚斜面から外洋における水深 200m以深の海洋中深層の水塊は、ゆっくりと流れる地球規模の大循環等によって再び表層へ上昇するまで数百年～数千年を要し、炭素固定機能を有するとされる²⁾。

草体（葉体）の枯死・脱落量は、現地調査における測定結果もしくは、現存量や生産量から推定し、これに炭素含有率及び移送割合等に乗じて、海洋中深層へ移送する炭素量を求めた。

④難分解性有機物の分泌

海藻草類は、生産した有機物の一部、またはかなりの部分を様々な代謝生産物として、細胞外に分泌することが知られ¹⁰⁾、被食抑制のための忌避物質としての機能を持つとされる⁹⁾。このうちフミン酸等の難分解性物質については、海洋における有機炭素の貯蔵という観点から大きな意味を持つと考えられている²⁾。

藻体から分泌される有機物量は総生産量の 40%²⁾とされる。この内、難分解性物質の割合については、直接的な知見は得られていないが、海洋全体では生産された溶存有機物の数%～十数%は、海水中に数百年～数千年の時間規模で滞留する²⁾とされる。また、藻体そのものが分解されるときに形成されるフミン酸の割合は、総生産量の約 9%¹⁰⁾との知見がある。本検討では分泌物の 10%が難分解性物質になると仮定した。



注) 本調査では、炭素固定量のうち長期間固定される量について算定の対象とした。

図-2 本調査における炭素固定量算出の考え方

(2) 炭素固定量試算結果

上記の考え方を踏まえて、アマモ場における長期的な炭素固定量を既往の調査研究データをもとに試算した。既往データが得られない項目については、他のタイプの藻場での情報を参考に仮定した。藻場における長期的な炭素固定量の試算結果を表-1に示す。表-1には、海藻類藻場についても、アマモ場と同様に炭素固定量を試算し、比較した。なお、アマモから有機物として分泌される難分解性物質については、アマモ場の生産量を $0.26\text{kg-C/m}^2/\text{年}^{13)}$ とし、純生産量に対する分泌量の率 $0.4^{2)}$ 、分泌された有機物に対する難分解化する率 0.1 (鈴木²⁾等より仮定) を乗じて、分泌される有機物のうち難分解化する量を $0.01\text{kg-C/m}^2/\text{年}$ と試算した。

その結果、アマモ場における長期の炭素固定量は $0.10\text{kg-C/m}^2/\text{年}$ と試算された。なお、アマモ場の最小現存量は、鈴木²⁾に示される現存量の最小値 0.07kg-dw/m^2 に、炭素含有率 $30\%^{13)}$ を乗じて得た。また、藻場内での堆積については、アマモ場の生産量を $0.26\text{kg-C/m}^2/\text{年}^{13)}$ に $16\%^{5)}$ を乗じて得た。アマモ場では藻場内での堆積による炭素固定が大きな割合を占めている。

表-1 藻場における長期的な炭素固定量の試算結果

要素	単位 : $\text{Kg-C/m}^2/\text{年}$			
	アマモ場	アラメ・カジメ場	コンブ場	ガラモ場
最小現存量 (定常的生物量)	0.02	0.34	0.09	0.19
藻場内での堆積	0.04	—	—	—
海洋中深層への移送	0.03	1.29	—	0.43
藻体からの分泌 (難分解性物質)	0.01	0.04	0.04	0.06
固定量合計	0.10	1.67	0.13	0.68

注) —は、炭素固定量算定の要素として考慮していない。

4. まとめ

本論文は、水産基盤整備事業のうち藻場造成事業の便益をより適切に把握するために、これまで定量化できないため費用対効果分析の対象とされていなかった炭素固定効果の定量化を行ったものである。

この結果、海草藻類による炭素循環過程の中で、①常時生物体に固定・貯留される量 (最小現存量)、②堆積物として海底に固定される量、③沖合深所へ移送・隔離される量、④分泌される溶存有機物のうち難分解性物質の量、が長期的な炭素固定に貢献する過程と考えられた。海水中や空气中に炭酸イオンやガスとして排出されにくいこと、海草藻類が温室効果ガスの抑制に貢献できると考えられた。そこで、以上の4つの過程について既往の定量的なデータを収集整理し、藻場のタイプ別に長期的な炭素固定量を試算した結果、アマモ場、アラメ・カジメ場、コンブ場およびガラモ場で各々 $0.10\text{kg-C/m}^2/\text{年}$ 、 $1.67\text{kg-C/m}^2/\text{年}$ 、 $0.13\text{kg-C/m}^2/\text{年}$ および $0.60\text{kg-C/m}^2/\text{年}$ と算定され、各藻場における長期的な炭素固定量を定量的に評価することが可能と考えられた。さらに、これに二酸化炭素の回収・固定等に係るコストや二酸化炭素の排出権取引価格を利用することにより、藻場の炭素固定効果を貨幣化することができ、今後の藻場造成事業における便益をより適切に把握できると考えられた。

ただし、本検討での藻場の炭素固定機能の定量化は、藻場のタイプごとに参考となる知見を収集整理しとりまとめたもので、特定の海域や海藻草類の種類を限定した値ではない。最小現存量や生産量等の値は相互に関連し、地域や海藻草類の種類によって異なると考えられるため、地域や海域特性の考慮が必要である。また、海洋中深層への移送については、藻場が成立している沿岸海域の中には、水深数百m以上の外洋に面している場所も多く、このような海域では、藻場で生産された大量の海藻類が、海洋中深層へ移送しているものと推察される。流れ藻となったホンダワラ類は、外洋において浮力の低下に伴い、海底へ沈降すると考えられる。また、このような流れ藻は漂流中も生長を続けていることから、藻場の現存量から把握される生物量より多くの量が、海底へ沈降しているものと考えられる。しかし、これらの海洋中深層への移送量については知見がなく、海底地形や周辺の海流、潮流流等の流動特性によっても異なると考えられる。

そのため、藻場の炭素固定機能に関しては、今後さらに炭素固定量の算定方法の確立、炭素固定量の適正な評価、炭素固定量の試算結果についての検証等、多くの課題が残されている。特に、本検討では藻場から海洋中深

層への移送量が相当程度あるものと試算されたが、この過程については知見の不足から過大推定となっていることから、精度の高い定量的な知見を得ることが重要であり、海洋中深層への移送量を把握する効果的な現地調査手法の開発、シミュレーションによる解析など、様々な視点からの調査・研究が望まれる。

5. 成果の活用

本調査から、海草藻類（藻場）による長期的な炭素固定の考え方を確立することができ、アマモ場、アラメ・カジメ場、コンブ場およびガラモ場における長期的な炭素固定量を定量的に評価することが可能と考えられた。さらに、これに二酸化炭素の回収・固定等に係るコストや二酸化炭素の排出権取引価格を利用することにより、藻場の炭素固定効果を貨幣化することができ、今後の藻場造成事業における便益をより適切に把握できると考えられた。

参考文献

- 1) 寺脇利信・新井章吾：「9. アラメ・カジメ類」．大野正夫編著，有用海藻誌，内田老鶴圃，東京，133-158，2004.
- 2) 鈴木款：海洋生物と炭素循環．東京大学出版会，東京，7，71-72，81-83，1997.
- 3) 菊池泰二：「1・2 藻場生態系」．山本護太郎(編)海洋学講座9 海洋生態学．東京大学出版会，東京，23-37，1973.
- 4) 佐々木克之：内湾および干潟における物質循環と生物生産【11】アマモとアオサの生長と窒素およびリンの循環．海洋と生物 94，16(5)，400-406，1994.
- 5) Caros M. Duarte and Just Cebrian：The fate of marine autotrophic production．Limnology & Oceanography，41(8)，1758-1766，1996.
- 6) 飯泉仁：大型海藻類は二酸化炭素の吸収にどれだけ役にたっているか．日本海区水産試験研究連絡ニュース，No. 401，5-7，2003.
- 7) 徳田廣・大野正夫・小河久朗：海藻資源養殖学 水産養殖学講座第10巻．緑書房，東京，119-120，203-206，208-210，221-223，233-238，1987.
- 8) 細川真也・三好英一・内村真之・中村由行：メソコスム水槽におけるアマモ地上部の現存量と生長・脱落速度の季節変動．港湾空港技術研究報告，45(3)，25-45，2006.
- 9) 谷口和也：磯焼けを海中林へー岩礁生態系の世界ー．裳華房，東京，123-130，1998.
- 10) 大和田紘一：「15. 藻類の細胞外代謝生産物とその生態的役割」．秋山優・有賀祐勝・坂本充・横浜康継(共編)藻類の生態．内田老鶴圃，東京，505-531，1986.
- 11) 石岡昇・三上信雄・浅川典敬：藻場の水質浄化機能について～定量的評価手法に関する一考察～．第5回全国漁港漁場整備技術研発表会講演集，8-14，2006.
- 12) 三上温子・小松輝久・青木優和・横浜泰継：伊豆半島の大浦湾におけるガラモ場の年間純生産量の推定．月刊海洋，37(7)，499-502，2005.
- 13) 村岡大祐：三陸沿岸の藻場における炭素吸収量把握の試み．東北水研ニュース 65，2003.
- 14) 新井章吾：「二章 流れ藻と寄り藻」．大野正夫(編)21世紀の海藻資源ー生態機構と利用の可能性ー，緑書房，東京，31-49，1996.
- 15) 寺脇利信：「一章 藻場」．大野正夫(編)21世紀の海藻資源ー生態機構と利用の可能性ー．緑書房，東京，1-30，1996.

関連情報

- 1) 平成18年度水産基盤整備調査委託事業 漁場の費用対効果分析手法の検討調査（藻場・干潟における炭素固定効果検討）報告書，水産庁漁港漁場整備部・財団法人漁港漁場漁村技術研究所

*本調査は、水産基盤整備調査委託事業により実施したものである。