河口干潟におけるヘナタリの炭素埋没量に関する基礎的研究

A Fundamental Study on Burial Carbon by *Cerithidea cingulata* in Tidal Flat of River Mouth

大谷壮介¹・上月康則²・山中亮一³

Sosuke OTANI, Yasunori KOZUKI and Ryoichi YAMANAKA

The carbon captured by living organisms in oceans is stored in the form of sediments from mangroves, salt marshes and seagrasses. We evaluated the blue carbon sinks by gastropod *Cerithidea cingulata* in river mouth tidal flat. We determined oxygen consumption of *C. cingulata* in the air and water conditions. Oxygen consumption grew with increasing temperature and shell length in both conditions. Approximately 80% of the carbon biomass was an inorganic carbon from shell origin. We calculated that the amount of carbon source as respiration and dead was 26 kgC/year, sink as production, shell formed, shell buried was 40 kgC/year in this muddy tidal flat. These results indicated that *C. cingulata* plays a role for contribution to sink the blue carbon.

1. 緒論

2009年、国連環境計画（UNEP）により、地球上の生物が固定化する炭素の55%がブルーカーボン由来であることが報告された（Nellemannら、2009）。その中でも海洋生態系によって固定、埋没される炭素（ブルーカーボン）において、底生生物の役割が大きいと言われているが、干潟では従来から有機物の生産・分解機能の研究が中心であり、炭素の埋没する機能やそのメカニズムについては未だ明らかになっていない。そこで本研究では、河口干潟において、腹足類の一種であるヘナタリ *Cerithidea cingulata* に着目し、干潟における腹足類の炭素埋没量を推定し、底生生物による炭素埋没量を明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

(1) 現存量調査

調査は勝浦川河口干潟において2004年1月～2009年9月まで行った（図-1）。ヘナタリの現存量調査は泥質干潟（約5000m²）の13地点において50×50cmの方形区を用いて、まず方形区内の表層に生息していたヘナタリを採集し、深さ約2cmまでの堆積物を2mmふるいでふるい、ふるい上に残ったヘナタリを採集した。採集したヘナタリは実験室に持ち帰り、殻高の測定を行い、個体数を記録した後、元の場所へ返した。ヘナタリの現存量調査結果より、コホート解析によって年齢別個体群に分割し、生産量は平均生息密度に個体の平均増重量を乗じたもの

として、死亡量は生息密度の減少量に平均重量を乗じたものとしてそれぞれ以下の式より算出した。

$$P = \sum (W_{t+1} - W_t) \times (N_{t+1} + N_t) / 2 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$M = \sum (W_{t+1} + W_t) \times (N_t - N_{t+1}) / 2 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、P：生産量、M：死亡量、W_t：時間tにおけるコホートの平均乾燥重量、N_t：時間tにおけるコホートの平均個体群密度である。本研究では大谷ら（2011）によって計算されたヘナタリの成長曲線および個体群密度から表-1に示したヘナタリの殻高と各項目の関係をを用いて生産量、死亡量を算出した。なお、貝殻の無機炭素については、乾燥させた貝殻を600℃の電気炉で繰り返し灰化を行った後、元素分析装置（Thermo Finigan 社製 FLASH EA1112）にて炭素含有量の測定を行った。

(2) 呼吸量

ヘナタリの呼吸量を定量化するために、干潟が干出している場合と冠水している場合を想定した2通りの実験を行った。干潟が干出している場合を想定した実験では、酸素消費量測定装置（O₂UP TESTER, TAITEC 社製）を用いてヘナタリの陸上での酸素消費速度の測定を行った。本装置は容器内に水酸化ナトリウムを入れることによってヘナタリが排出した二酸化炭素は吸収され、酸素

図-1 調査地域

1 正会員	博(工)	京都大学大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター研究員
2 正会員	博(工)	徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授
3 正会員	博(工)	徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部講師

表-1 ヘナタリの殻高と各項目の関係 (Y:各項目, X:ヘナタリの殻高 (mm))

項目	回帰式	決定係数:R ²
身湿重 (g wet)	$Y = 1.50 \times 10^{-6} X^{3.76}$	0.92
身乾重量 (g dry)	$Y = 1.72 \times 10^{-6} X^{3.28}$	0.93
身全有機炭素量 (mgC)	$Y = 1.51 \times 10^{-3} X^{3.05}$	0.93
身全窒素量 (mgN)	$Y = 1.72 \times 10^{-3} X^{2.50}$	0.76
殻乾重量 (g dry)	$Y = 7.19 \times 10^{-3} X^{2.93}$	0.92
殻無機炭素量 (mgC)	$Y = 2.00 \times 10^{-3} X^{3.35}$	0.91

消費速度のみを測定している。本研究では同一個体を用いて、同一の条件下で水酸化ナトリウムを用いた系および水酸化ナトリウムを用いない系にて実験を行った。これによって、水酸化ナトリウムを用いた系では酸素消費速度が測定され、水酸化ナトリウムを用いない系では二酸化炭素が吸収されないことから（酸素消費速度＝二酸化炭素排出速度）が測定される。これら2つの値から二酸化炭素排出速度を推定した。実験は、1年を4シーズンに分け、温度をそれぞれ20℃（春）、30℃（夏）、20℃（秋）、10℃（冬）に設定し、測定を行った。なお、実験に供した個体はそれぞれの季節において干潟で採取したあと、実験室にて1週間程度の馴致を行った後に、24時間の絶食状態におき、糞の排泄を行い、測定温度と同様の温度条件下で実施した。

一方、干潟が冠水している場合を想定した実験では、ヘナタリの中での酸素消費速度を測定した。干出を想定した実験と同様にヘナタリを採取したのち、実験室にて24時間の絶食状態におき、糞の排泄を行った後、海水で満たした100mlのフラン瓶にヘナタリを投入し、ストレス解消のため2時間放置した。その後、酸素飽和させた状態のオートクレーブ滅菌後の過海水と交換し、溶存酸素濃度の変化から酸素消費速度を測定した（東亜DKK製 DO21-P）。実験条件は水温を30、20、10℃に設定し、測定は3時間とした。

3. 結果

(1) 酸素消費速度

a) 干出中の酸素消費速度

それぞれの季節におけるヘナタリの酸素消費速度と殻高の関係を図-2に示す。ヘナタリの酸素消費速度は測定温度が上昇するほど速くなる傾向が確認された。30℃および10℃の酸素消費速度は、それぞれ24.4および0.5 $\mu\text{LO}_2/\text{h}$ であり、30℃の方が49倍速くなった（表-2）。これは、温度が上昇することに伴いヘナタリの呼吸活性が高くなったためである。ヘナタリの酸素消費速度と殻高の回帰式を示した表-3より、すべての季節において統計的に有意な回帰式が得られた。

b) 冠水中の酸素消費速度

干潟が冠水している水中でのヘナタリの酸素消費速度

図-2 干出中のヘナタリの酸素消費速度

表-2 ヘナタリの酸素消費速度の比較

温度 (℃)	酸素消費速度 (μLO ₂ /h) 干出	冠水
10	0.5	5.4
20	10.0	12.4
30	24.4	24.8

表-3 干出中のヘナタリの殻高と酸素消費速度の関係 Y:酸素消費速度 (μLO₂/h), X:ヘナタリの殻高 (mm)

季節	回帰式	決定係数:R ²
春	$Y = 0.111 X^{1.477}$	0.45
夏	$Y = 2.016 X^{0.801}$	0.55
秋	$Y = 0.034 X^{1.820}$	0.77
冬	$Y = 5.814 \times 10^{-8} X^{4.903}$	0.67

と殻高の関係を図-3に示し、その回帰式と決定係数を表-4に示す。干出時と同様に、ヘナタリの酸素消費速度は測定温度が上昇するほど速くなる傾向が確認された。30℃および10℃の平均の1個体当たりの酸素消費速度は、それぞれ24.8および5.4 $\mu\text{LO}_2/\text{h}$ であり、30℃の方が4.6倍速くなった（表-2）。また、干出時と冠水時のヘナタリの酸素消費速度を比べると、10℃を除いてほぼ同ような値を示した。

c) 個体群の炭素排出量

現存量結果より、コホート解析によって年齢別個体群に分割し、個体群の成長を追ったヘナタリの成長曲線および個体群密度の結果を用いて（大谷ら, 2011）、本干潟におけるヘナタリのコホート単位での呼吸による炭素排出速度の推定を行った。ヘナタリの個体群の炭素排出速度を推定した期間は毎月の現存量調査の結果から得られたコホート毎に、それぞれの調査月の干出および冠水時間を考慮して算出した。ここでは、春（3～5月）、夏（6～8月）、秋（9～11月）、冬（12～2月）の4つの季節に区分した。なお、酸素消費速度から二酸化炭素排出速度へ換算を行うために干出時を想定した実験より得られた呼吸商を用いており、呼吸商は0.68～0.72の範囲で表され、季節間での差はほとんどなかったことを確認して

図-3 冠水中のヘナタリの酸素消費速度

表-4 冠水中のヘナタリの殻高と酸素消費速度の関係 Y: 酸素消費速度 ($\mu\text{LO}_2/\text{h}$), X: ヘナタリの殻高 (mm)

季節	回帰式	決定係数: R^2
春	$Y = 0.0477X^{2.017}$	0.80
夏	$Y = 0.0908X^{1.653}$	0.89
秋	$Y = 0.0477X^{2.017}$	0.80
冬	$Y = 2.254X^{0.341}$	0.62

表-5 ヘナタリの呼吸商

季節	温度 (°C)	呼吸商	決定係数: R^2
春	20	0.69	0.85
夏	30	0.71	0.85
秋	20	0.72	0.83
冬	10	0.68	0.83

いる (表-5)。

ヘナタリ個体群の呼吸による炭素排出速度の経月変化を図-4に示す。炭素排出速度は、春期から夏期に徐々に増加し、夏期に最も高くなり、秋期から冬期かけて減少する傾向が認められ、季節変化の大きいことが確認できる。炭素排出速度は、2005年2月に $0.026\text{gC}/\text{m}^2/\text{month}$ と最も低く、2008年10月に $1.23\text{gC}/\text{m}^2/\text{month}$ と最も高かった。

(2) 炭素収支

大谷ら (2011) により得られたヘナタリの各コホート

の成長曲線および表-1の結果を用いて現存量、生産量、死亡量の推定をそれぞれ行った。ヘナタリの現存量は 7.85 ± 0.52 ($2.0 \sim 18.9$) gC/m^2 と冬期に低い値を示したのに対して、春期から秋期に高い値を示し (図-5)、その内訳として約8割が無機炭素によるものであった。

ヘナタリによる炭素固定量および排出量を表-6に示す。ヘナタリの有機炭素の生産量は $1.05 \pm 0.22\text{gC}/\text{m}^2/\text{year}$ 、無機炭素の生産量は $3.81 \pm 0.84\text{gC}/\text{m}^2/\text{year}$ であった。当泥質干潟ではヤマトオサガニの調査も同時に行われており、ヤマトオサガニの年間生産量は $5.58 \pm 0.51\text{gC}/\text{m}^2/\text{year}$ (大谷ら, 2006) と、ヘナタリの有機炭素の生産量はヤマトオサガニの生産量の1/5以下であるが、貝殻形成による無機炭素の生産量も考慮することで、有機炭素の生産量と合わせて $4.86 \pm 1.01\text{gC}/\text{m}^2/\text{year}$ の固定量が見積もられる。

ヘナタリが死亡することによって、有機炭素は $0.85 \pm 0.18\text{gC}/\text{m}^2/\text{year}$ が排出されるが、無機炭素である貝殻は固定される。この固定される貝殻の無機炭素は2006年にマイナスを示していたが、他の年を比べると貝殻形成によって生産された無機炭素と同等かそれ以上の値を示しており、2006年の値を除いたヘナタリの死亡による貝殻の固定量は $3.23 \pm 0.31\text{gC}/\text{m}^2/\text{year}$ であった (表-6)。また、排出量である呼吸量は $4.26 \pm 0.49\text{gC}/\text{m}^2/\text{year}$ と死亡量に比べて約5倍であった。

以上のことより、対象とした泥質干潟の面積が 5000m^2 であることから本干潟域での炭素収支を算出すると、排出量は $26\text{kgC}/\text{year}$ 、固定量は $40\text{kgC}/\text{year}$ と固定量の方が大きくなっていった。

4. 考察

干潟における炭素動態は、有機物の生産・分解に関する研究が中心であり、固定量の中でも埋没量に着目した研究はマングローブにおける事例がある。マングローブではリターは埋没し (赤松ら, 2002)、これらはカニ類

図-4 個体群の呼吸による炭素排出速度

表-6 炭素固定量および排出量

期間 (年/月)	生産量 (有機炭素)	固定量 (gC/m ² /year)		排出量 (gC/m ² /year)	
		貝殻形成 (無機炭素)	貝殻死亡量 (無機炭素)	呼吸量 (有機炭素)	死亡量 (有機炭素)
04/01～04/12	0.59	2.16	3.40	3.15	0.93
05/01～05/12	1.86	6.89	2.33	4.04	1.16
06/01～06/12	0.72	2.53	-1.20	5.17	0.19
07/01～07/12	1.04	3.67	3.76	4.67	1.13
08/01～08/12	0.93	3.37	3.44	6.01	0.96
平均値±SE 計	1.05±0.22	3.81±0.84 8.09	3.23±0.31	4.26±0.49 5.11	0.85±0.18

に利用される形で有機炭素の食物連鎖が形成されており、残った物はデトリタスとなって分解・埋没する過程で、一部はデトリタス食者に利用されている。また、底生生物は高次捕食者による被食や死亡個体はアラムシロガイ等の腐肉食者、バクテリアにも利用される炭素フローがある。一方で、河口干潟では、腹足類が多く生息しており、その貝殻はヤドカリ類に利用されるものの、長期間にそのままの形で埋没していく。これらは二次的に利用されることはなく、分解・系外への除去もないため、その埋没量は大きいと考えられる。

ヘナタリの無機炭素生産量/有機炭素生産量比は3.59±0.04となり、中村ら(2003b)からマガキやサルボウ等の主要貝類の8種の無機炭素/有機炭素比は1.6～3.5と算出され、アサリと同程度で他の貝類と比べると高い値を示した。つまり、ヘナタリは他の貝類と比べると有機炭素生産量に対して無機炭素生産量が高く、貝殻形成による無機炭素が大きく生産されていることが示される。懸濁物除去機能の高い二枚貝の中でもアサリやカキ等の水産有用種は漁獲により干潟から系外へ運び出されるが、ヘナタリは水産対象種でもなく、また系外除去するような捕食者もないことから、堆積物上に葡萄する腹足類は干潟周辺に埋没しやすい生物と思われる。

ところで、森林の炭素固定量に着目してみると温帯林の純一次生産量は0.65kgC/m²/yearと報告されている(大谷, 2001)。本対象干潟における底生微細藻類による一次生産量は0.32kgC/m²/yearと他の干潟と比べると低い

(大谷ら, 2006)、干潟域ではこのほかにも植物プランクトンによる一次生産も行われている。また、地下茎や草体、海中への流出・移送等を考慮した藻場による炭素固定量は、アマモ場で0.10kgC/m²/year、アラメ・カジメ場で1.67kgC/m²/year、コンブ場およびガラモ場でそれぞれ0.13kgC/m²/yearおよび0.60kgC/m²/yearと試算されている(伊藤ら, 2009)。これらと比較すると、ヘナタリの炭素固定量は8.09gC/m²/yearと森林の炭素固定量の約1/80程度、アマモ場の約1/12程度であった。

また、海水中の二酸化炭素量へ直接的に影響する代謝機能として呼吸の他に石灰化に伴う分圧の上昇を検討する必要がある。石灰化は以下の式(3)で表され、石灰化に伴う二酸化炭素の固定はサンゴ礁については詳細に調べられており、室内実験(仲座ら, 1994)、現地実験(茅根, 1993)によりサンゴは二酸化炭素を固定していることが示されている。

中村ら(2002, 2003a)はウバガイやカキの石灰化に伴う二酸化炭素の分圧を検討しており、同様の方法を用いてヘナタリにも適用するとサンゴ礁の場合には1molの石灰化に伴って0.6molの二酸化炭素を排出することから、石灰化に伴う二酸化炭素排出量は2.29kgC/m²/yearと推定された。これを表-6に示したヘナタリの排出量に加算すると、排出量は7.40kgC/m²/yearとなり、固定量と比較することでヘナタリは0.69kgC/m²/yearを炭素固定していると試算できる。なお、式(3)で表される石灰化の

過程は水中で起こっているため、干潟の干出時間を考慮すると、さらに二酸化炭素排出量は低くなると見積もられる。したがって、腹足類であるヘナタリはウバガイやカキ等の二枚貝とは異なり、干満を繰り返す干潟域では石灰化に伴う二酸化炭素排出の過程に特徴がある。以上のことから、ヘナタリの炭素固定の特徴は、固定量は少ないが、長期間、土壤中に貯蓄するという、炭素の埋没時間に大きな特徴があると言える。

一般に、ヘナタリはワンド形式の泥質干潟の高い地盤環境を好む(大谷ら, 2011)。このような環境は、一次生産活性が高く、また付着藻類を摂餌するための干出時間も長い。そのため藻類からヘナタリへの転換効率も高いことが推察される。またワンド環境は波浪や洪水等の攪乱規模や頻度が小さいことから、場も安定しており、ヘナタリの生産に伴う炭素の埋没も安定して行われると考えられる。このように、本研究では炭素埋没といった観点からワンド干潟の新たな環境価値について論じることができた。

5. 結論

- 1) ヘナタリの酸素消費速度を干出、冠水を想定した実験系にて計測した結果、温度、殻高が増加するに伴って酸素消費速度も大きくなることを示した。また、干出時と冠水時のヘナタリの酸素消費速度を比べると、10℃を除いてほぼ同じような値を示した。さらに、毎月の現存量調査結果を用いて、ヘナタリ個体群の呼吸による炭素排出速度を算出したところ、炭素排出速度は、春期から夏期に徐々に増加し、夏期に最も高くなり、秋期から冬期かけて減少する傾向が認められ、季節変化の大きいことが推定された。
- 2) ヘナタリの炭素現存量を有機、無機炭素別に算出した結果、約8割が貝殻由来の無機炭素によるものであった。ヘナタリの無機炭素と有機炭素の生産量比は他の主要貝類と比較した結果、アサリと同程度で他の貝類と比べると高い値を示した。よって、ヘナタリは有機炭素生産量に対して無機炭素生産量が高く、貝殻形成による無機炭素が大きく生産されていることがわかった。
- 3) 5年間のヘナタリの炭素収支を算出すると、ヘナタリ

が死亡することにより、無機炭素である貝殻は干潟に固定され、有機・無機炭素生産量を足し合わせると8.09gC/m²/yearが干潟に固定されていることがわかった。また死亡しても、貝殻として40kgC/yearの炭素を干潟内に埋没させる機能がヘナタリにはあることがわかった。

謝辞：ヘナタリの貝殻の無機炭素量を測定するにあたり有益なご助言をいただいた磯野良介氏(財団法人海洋生物環境研究所)に謝意を表します。また、本研究を実施するにあたり、実験・調査に協力頂いた徳島大学研究室学生一同に感謝いたします。

参 考 文 献

- 赤松良久・池田駿介・中嶋洋平・戸田祐嗣(2002): 現地観測に基づくマングロープ水域における有機物・栄養塩輸送に関する研究, 土木学会論文集, 698, pp.69-80.
- 伊藤 靖・中野喜央・松下 訓・三上信雄・横山 純・桐原 慎二・能登谷正浩(2009): 藻場による炭素固定量の試算, 水産工学, 46, pp.135-146.
- 大谷壮介・上月康則・仲井薫史・石山 哲・村上仁士(2006): 干潟の底生微細藻類量の季節変動に及ぼすヤマトオサガニの摂餌圧の影響に関する考察, 海岸工学論文集, 53, pp.1056-1060.
- 大谷壮介・上月康則・山中亮一(2011): 徳島県勝浦川河口干潟におけるヘナタリの分布特性と個体群動態, 土木学会論文集 B3-67 (海洋開発), 印刷中.
- 大谷義和(2001): 二酸化炭素フラックス, 森林科学, 33, pp.10-17.
- 茅根 創(1993): サンゴ礁による二酸化炭素の固定, 地質ニュース, 465, pp.19-25.
- 仲座栄三・津嘉山正光・清家邦宏(1994): サンゴの光合成と二酸化炭素の固定に関する研究, 海岸工学論文集, 41, pp. 1026-1030.
- 中村義治・奥出 壮・寺澤知彦・関根幹男・三村信男(2003a): CO₂固定量評価に係わる貝類代謝モデルの開発-養殖カキ-, 海岸工学論文集, 50, pp.1166-1170.
- 中村義治・金網紀久恵・磯野良介・三村信男(2002): 貝類の生物機能と水域環境への影響に関する全国評価, 海岸工学論文集, 49, pp.1371-1375.
- 中村義治・金網紀久恵・磯野良介・三村信男(2003b): 我が国における主要貝類の生物量と生物機能の分布特性, 海岸工学論文集, 50, pp.1296-1300.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdes, L., DeYoung, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Ed.) (2009): Blue carbon: The role of healthy oceans in binding carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. pp.1-78.