

炭素収支による東京湾アサリ個体群の生物機能評価

金網紀久恵* ・中村 義 治**・上 月 康 則***
村上 仁 士****・柴田 輝 和*****

複数の年級群をもつ個体群の殻長組成や個体数を考慮できる炭素収支評価モデルを構築し、炭素収支の観点から盤洲海域でのアサリ個体群の生物機能を評価した結果、次のような成果が得られた。①アサリ個体群の生物機能は年令や生息する地盤高さによって異なること、②炭素収支の季節変動は、夏季と春季に固定側が、冬季には排出側が上回ること、③海域全体では、アサリ個体群によって年間 24.7 kt の炭素が固定、23.4 kt の炭素が排出され、漁獲によって約 0.5 kt の炭素が除去される。一方 CO₂ 生成量は最大で呼吸と貝殻形成量の合計 4 ktC/y に相当する。

1. 緒 論

アサリ (*Ruditapes philippinarum*) の水質浄化に着目した研究例は多く、近年では小沼ら (2002) の熱量を考慮した個体成長モデルによる単一年級群の成長に伴う懸濁物除去量の推定等の報告がある。しかしアサリの生物機能については懸濁物除去だけでなく、有機物固定機能や呼吸・貝殻形成に伴う CO₂ 生成等の負の効果についても評価しておく必要がある。また従来の物質収支の研究では平均殻長等を用いることで、殻長組成の形状を考慮していないものが多かった。しかし、アサリは殻長によって異なる代謝特性をもっていることを考えると、殻長組成の分布と個体数にも考慮した機能評価も行っておく必要がある。さらにアサリは生息場の物理的な環境によって個体の形状が異なり、それに伴い生物機能にも違いが生じることが考えられる。

そこで、代謝モデルと個体群動態モデルを用い、複数の年級群をもつ個体群の殻長組成や個体数を考慮できる炭素収支評価モデルを構築し、炭素収支の観点から盤洲海域でのアサリ個体群の生物機能を評価することを目的に本研究を行った。まず①代謝モデルによりアサリの成長を再現し、単一年級群の炭素収支により年令による生物機能の違いを明らかにした。次に②複数の年級群からなる殻長組成に基づく個体群動態を考慮したモデルにより、盤洲海域でのアサリ個体群を対象とした炭素収支評価モデルを作成し、現実に見合ったアサリ個体群の機能評価を行った。最後に③地盤高によるアサリ個体の形状の違いを殻長一重量関係式で表し、これを元に地盤高による生物機能の役割の違いを考察した。

2. アサリの生物機能評価方法

(1) 概 要

一般的に、貝類の生物機能は外部環境と生活史の各段

* 徳島大学大学院工学研究科
** 水博 (独法) 水産工学研究所土木工学部長
*** 正 会 員 工博 徳島大学助教授大学院工学研究科
**** フェロー 工博 徳島大学教授大学院工学研究科
***** 千葉県水産研究センター

階によって変化する生物の内在的生理作用から影響を受ける。後者については稚貝、未成貝、成貝でそれぞれ摂餌、排泄、呼吸、成熟等に関係する生理反応速度や死亡率等が異なる。一方環境条件によってもこれらの反応速度が異なってくる。その結果、有機物生産や水質浄化等の生物機能は季節、空間、年令に対し特異的に作用する。本研究では、これらの代謝特性の特異性に注目したウバガイの生物機能評価モデル (中村他, 2001) をもとに、水温と餌料環境としての *Chl. a* 量の変化に対するアサリの代謝特性の定式化を行い、アサリ個体群に適用し得る機能評価モデルの作成を試みた。

(2) モ デ ル

a) 個体成長 (代謝) モデル

アサリの代謝特性にもとづく炭素収支を基本とした成長過程を式 (1) に示した。水温及び *Chl. a* 濃度から換算した *POC* 濃度を餌料環境条件として与え、摂餌速度より算出した同化量から軟体部の成長量を求め、軟体部重量に見合った殻長を算出した。

①軟体部成長の基本式

$$\frac{dDW_c}{dt} = A - R - G \dots\dots\dots (1)$$

ここで、*DW_c* は軟体部の炭素重量 (mgC) で軟体部乾燥重量 *DW* とその炭素含有率の積である。*A* は同化量 (mgC/day) で $A = C - E = C \cdot AE$, *C* は摂餌速度 (mgC/day), *AE* は同化効率で *Chl. a* 濃度の関数 ($AE = 3.1 / (3.1 + Chl. a)$) とした。また、*E* は排泄速度で $E = C(1 - AE)$, *R* は呼吸速度 (mgC/day), *G* は生殖腺への配分 (mgC/day) である。

②貝殻の成長

千葉水試 (2001) による盤洲海域の殻長一軟体部重量関係式より、軟体部重量の成長に見合った殻長を設定し、殻長一殻重量関係式より殻重量を算出した。

$$\text{殻長 (cm)} \quad WW = 0.0398 \cdot \ell^{0.0885} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{貝殻重量 (g)} \quad DSW = 0.0887 \cdot \ell^{0.2238} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{貝殻の炭素重量 (mgC)} \quad DSW_c = DSW \cdot CS$$

ここで、*ℓ* は殻長 (cm) *WW* は軟体部湿重量 (g), *CS* は貝殻の炭素含有率である。

③代謝特性

$$\text{摂餌速度 } C = POC \cdot FT \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (4)$$

$$\leq 25^{\circ}\text{C} \quad FT = 0.264 \cdot 10^{0.031 \cdot \text{Temp.}} \cdot WW^{0.62} \cdot 24 \text{ h}$$

$$> 25^{\circ}\text{C} \quad FT = (0.0157 \cdot \text{Temp.} + 1.1789) \cdot WW^{0.62} \cdot 24 \text{ h}$$

$$\text{呼吸速度 } R = R' \cdot CR \cdot 24 \text{ h} \dots\dots\dots (5)$$

$$\leq 25^{\circ}\text{C} \quad R' = 0.0391 \cdot 10^{0.031 \cdot \text{Temp.}} \cdot WW^{0.7} \cdot 24 \text{ h}$$

$$> 25^{\circ}\text{C} \quad R' = (0.00264 \cdot \text{Temp.} + 0.198) \cdot WW^{0.7} \cdot 24 \text{ h}$$

ここで、 POC は懸濁態有機炭素濃度 (mgC/m^3)を表し、 $ZYM=37 \cdot \text{Chl. } a$ で設定した。 FT は濾水速度 (l/day)、 R' ($\text{ml-O}_2/\text{day}$)は呼吸速度、 Temp. は水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 WW は軟体部湿重量 (g)、 CR は呼吸量の炭素換算比である。 FT 及び R' は磯野 (1998, 2000)を用いた(ただし R' の WW の指数は二枚貝全般の0.7を用いた)。

④生殖腺の発達と産卵

盤洲のアサリは春季と秋季の2回産卵することが知られているが、2000年実測値では秋季の加入群は春季に比べて小さいため、本研究では産卵を6月～7月に設定した。生殖腺の発達は最低水温(2月)から産卵時期(6月)に達するまでの期間とし、殻長1.5 cm以上の個体が成熟するものとした。生殖腺の発達は軟体部の成長と独立した成長式を設定し、同化量から身肉と生殖腺の発達に配分する。生殖腺の成長が同化量で賄えない場合は軟体部から生殖腺に移行するものとした。産卵による炭素放出量は産卵期前後の軟体部重量減少率から推定し、最大で軟体部の20～30%と設定した。

b) 個体群動態モデル

アサリの個体群動態を連続した殻長組成の時間的推移として捉え、式(6)に示した資源変動方程式(中村, 1989)を用い計算した。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial UN}{\partial \ell} + Z \cdot N = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 N は殻長別個体数で殻長 ℓ と時間 t に依存する。 U は殻長の成長速度で代謝モデルの計算結果から与えられる。 Z は全死亡係数($Z=M+F$)、このうち F は漁期中における漁獲係数で、実測された生物量と M 及び漁獲実績から設定した。年間の全死亡係数 M は千葉水試による実測の個体数減少率より設定し、鳥羽(1988)によるアサリ稚貝の月別生残率をもとに月別に配分した。

c) 炭素収支モデル

アサリ個体群と周辺水域との物質交換に関係する項目は、排出項として4項目(呼吸、排泄、産卵、死亡貝の分解)、除去項として2項目(摂餌、貝殻形成)の炭素量を算出し、それらの収支計算を行った。

(3) 解析対象海域とそのアサリ生物量

解析対象である盤洲干潟で、千葉水試が2000年4月～2001年2月に実施した底生生物調査によると、当海域

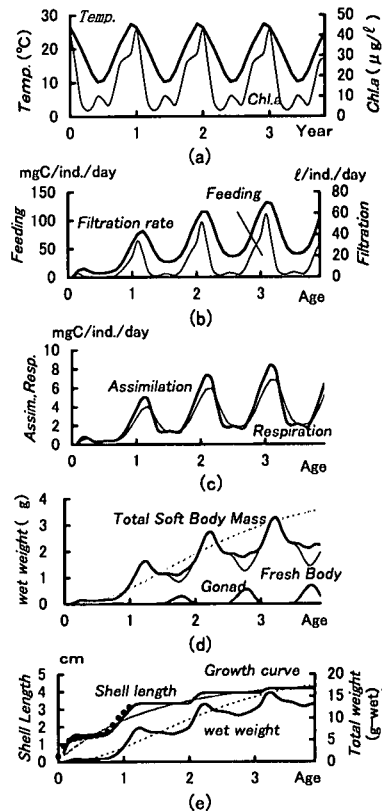
ではアサリの他バカガイ、ホトトギスガイ、シオフキガイ、イボキサゴ、アラムシロガイ等の軟体動物が高密度に生息し、その他多毛類、イソギンチャク類、ユビナガホンヤドカリ等が生息している。アサリの生物量が底生生物全体に占める割合は、季節変動があるものの春季～夏季にかけては7割～9割を占めており、アサリ個体群による炭素収支が当海域の底生生物による物質循環に大きく寄与していると考えられる。

3. アサリの個体成長と年令による生物機能の特性

(1) 個体の代謝特性

機能評価モデルによるアサリの個体代謝特性を図一に示す。(e)図はモデルで再現した殻長と重量の成長を表し、図中の実線はモデルによる計算結果、ドットは盤洲海域の現場における稚貝の成長(西沢他, 1992)をプロットしたものである。

モデルでは、殻長は水温・ $\text{Chl. } a$ 共に上昇する夏季に成長するが、秋季から冬季にかけて餌料不足のために同化量が呼吸量を下回ることや、春季には同化した炭素が



図中、(a)は水温と $\text{Chl. } a$ 、(b)は濾水と摂餌、(c)は同化と呼吸、(d)は軟体部と生殖腺重量、(e)は殻長と全重量を示した。

図一 アサリの個体代謝特性

生殖腺へ配分され産卵で放出されることによって軟体部重量が減少し、殻長の成長が停止する季節変動が得られた。これは現場における成長（図中ドット）とほぼ一致しており、海域の稚貝成長の季節変動を再現できた。

(2) 年令による生物量と炭素収支の変化

アサリの単一年級群における、年令による炭素収支の特性を図-2に示す。同図では年令による役割の違いを明瞭に表すために、同年令の貝は全て同じ殻長と仮定して算出したものである。

個体数は、自然死亡および漁獲により減少し、一方成長により個体当たりの重量は増大するため、個体群の生物量は極大値をもつ。盤洲海域におけるアサリ個体群の生物量は2年貝で最大となり、その後は減少することがわかった。

炭素収支は生物量を反映し、摂餌、排泄、呼吸、産卵、死亡貝の分解、貝殻形成のいずれも2年貝で最大となり、トータルの炭素の出入りも同様の傾向を示した。一方、排出と固定の差し引きの収支は、4年貝まで固定側が大きく、5年貝以上で逆転し僅かながら排出側が上回ることが大きな特徴である。炭素の出入りの総量は生物量の大きい2年貝が最大であるのに対し、収支は成長速度の大きい1年貝が固定側で最も大きく、年令により異なる特性を持つこともわかった。

(3) 年令による生物機能の変化

炭素収支の特性から、盤洲海域のアサリ個体群の生物機能は年令によって異なる役割をもつことが示された。1年貝においては海域の有機物を体内に固定する機能が最大であり、一方摂餌（濾過）による有機懸濁物の除去機能は2年貝が最大となる。

このようにアサリ個体群の生物機能は1～2年貝が大部分を担っており、3年貝以上の年令では個体群の生物機能に殆ど寄与しなくなることがわかった。さらに5年貝以上になると、年間の収支では炭素を固定する機能は

なくなり、呼吸や死亡分解による排出が上回るため、沿岸環境にとっては炭素の排出源となる。以上のことから、漁獲によって成貝を海域から除去することは、盤洲海域における炭素固定機能面では重要な役割を果たしていると推定された。

4. 殻長組成を反映した個体群の生物機能

(1) 個体群動態

2000年8月における盤洲海域のアサリの生物量は約20 ktであり、個体数は年間最大で殻長組成が2峰型を示す（千葉水試, 2001）。これは春季～初夏の発生群と放流種苗が加入したためと考えられるが、一方秋季の産卵期には目立った加入は見られなかった。そこで8月の殻長組成を元にして、殻長毎の成長と個体群動態から一年間の炭素収支を算出し、その生物機能を評価した。2001年2月以降の現場測定値はなく、モデルでは翌年春季の加入群については考慮していない。

現場で測定された殻長組成と、モデルにより計算した殻長組成の推移を図-3で比較した。モデルによる計算結果では、殻長階級毎の成長の過程をほぼ再現し、また当海域で知られる冬季の減耗と漁獲による漁獲対象群の減少等を再現できた。

(2) アサリ個体群の炭素収支と生物機能

盤洲海域全体では、アサリ個体群によって年間24.7 ktの炭素が固定され、23.4 ktの炭素が排出され、差し引きした1.3 ktの炭素が1年間にアサリ個体群によって固定される（図-4）。また0.5 ktCが漁獲によって系外へ除去される。アサリ個体群が濾過する水量は年間約160億 m^3 になり、これは東京湾の容積約175億 m^3 に相当する。同時に有機物濾過機能は年間約23.4 ktCであり、漁場面積12 km^2 に対して1 m^2 あたり年間約2 kgCに相当する。これは東京湾内湾における1 m^2 あたりの海水中の基礎生産量とほぼ同じオーダーであった。一方 CO_2 生成量は、最大で呼吸2.7 ktC/yと貝殻形成量1.3 ktC/yの合計4 ktC/yに相当するが、海水には緩衝作用があるため全てが CO_2 分圧の増大に寄与するものではない。

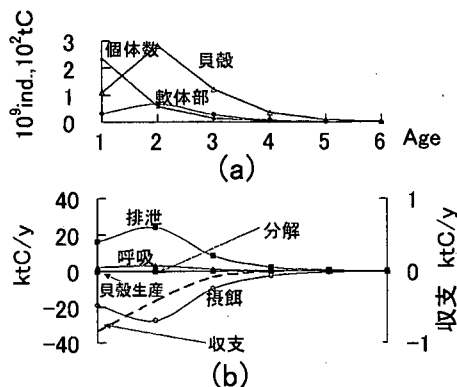


図-2 年令による炭素収支の特性

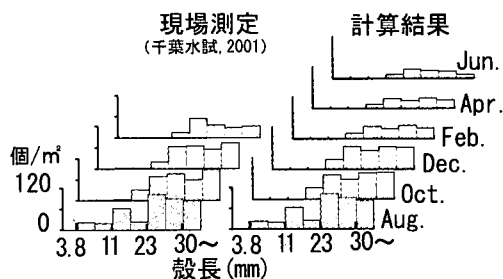


図-3 殻長組成の推移

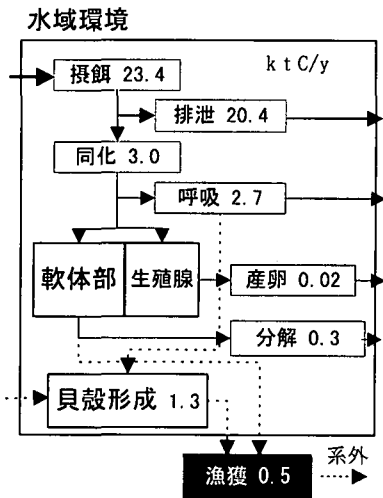


図-4 アサリ個体群による炭素収支

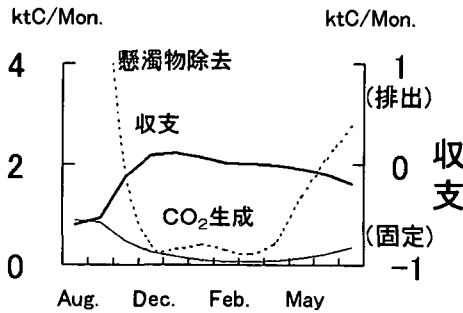


図-5 アサリ個体群の生物機能の季節変化

図-5 にアサリ個体群による生物機能の季節変化を示す。図より炭素収支は夏季と春季に固定側が、冬季には排出側が上回っていることがわかる。このことから内部生産の活発な夏季には懸濁物除去機能が增大し個体群は有機物を固定するが、餌料の少ない冬季には個体群に貯留した炭素を海域に排出しているようである。

5. 地盤高による個体形状の変化に基づく炭素収支の特性

次にアサリの肥満度は潮下帯から干潟の岸側へ向かって低下し、丸型指数（殻幅と殻長の比）は増大することが知られている（柿野，2000）。こうした形状の違いが、個体群の炭素収支や生物機能にどのように反映しているかを調べる目的で、以下の解析を行った。

(1) 殻長と重量の関係

千葉水試によるアサリ個体計測結果を地盤高別に整理した（千葉水試，2001）。なお計測に用いたアサリの採取地点はいずれも AP+0 m（荒川工事基準面，潮位表基準面とほぼ同じ）以上の場所であった。また全計測結果が

ら求めた殻長-体重関係式は $WW=0.1779 \cdot l^{3.1524}$ で、殻長-軟体部重量と殻長-殻重量関係は式（2），式（3）に示したとおりである。地盤高により AP+0 m~0.4 m，AP+0.4 m~0.8 m，AP+0.8 m 以上の 3 海域に分け、それぞれ実測した重量と上記関係式から求めた重量との偏差を平均し、平均値の差について t 検定を行った。

その結果、表-1 に示すように春季と秋季および冬季に有意差が認められた。餌料の少ない冬季から春季にかけては、殻長と軟体部重量の関係にのみ有意差があり、地盤高の高い海域は潮下帯より餌の供給が少なく身痩せしている現象が表された。一方栄養豊富な夏季を経た秋季では、地盤高の高い海域は丸型指数が大きいくとも反映して、殻長に対する体重、軟体部重量、殻重量が共に他の海域より大きい。

以上のように、地盤高による肥満度や形状の差が殻長-重量関係に現れていることが示されたので、この現象を機能評価モデルに組み込むために地盤高毎の回帰式を作成した。表-1 にパラメータ（ $W=al^b$ 式の a と b ）を示す。

(2) 地盤高による炭素収支と生産力の特性

単位面積当たりのアサリの生物量は、潮下帯及び AP+0 m~0.4 m 帯で 1.0 kg/m²，AP+0.4 m~0.8 m 帯で 2.4 kg/m²，AP+0.8 m 以上で 1.5 kg/m² で、表-1 に示した殻長-軟体部重量及び殻長-殻重量関係式を適用し、地盤高毎に単位面積当たりの炭素収支を算出した。

表-1 地盤高による殻長-重量関係の定

		4月	6月	8月	10月	12月	2月
全重量	I- II	×	×	×	○	○	×
	II- III	×	×		×	×	×
	I- III	×	×		○	○	×
軟体部重量	I- II	●	×	×	○	○	×
	II- III	×	●		×	×	●
	I- III	●	●		○	○	●
殻重量	I- II	×	×	×	○	○	×
	II- III	×	×		×	×	×
	I- III	×	×		○	○	×
全重量	I AP+0 m a	0.257	0.253	0.273	0.248	0.268	0.237
	~0.4 m b	2.807	2.891	2.794	2.883	2.804	2.992
	II AP+0.4 m a	0.228	0.228	0.279	0.228	0.274	0.274
	~0.8 m b	2.919	2.919	2.785	2.919	2.821	2.821
	III AP+0.8 m a	0.239	0.239	—	0.239	0.249	0.249
	以上 b	2.880	2.880	—	2.880	2.888	2.888
軟体部重量	I AP+0 m a	0.062	0.066	0.063	0.043	0.035	0.040
	~0.4 m b	2.875	2.865	2.794	3.051	2.974	3.015
	II AP+0.4 m a	0.076	0.076	0.064	0.034	0.051	0.051
	~0.8 m b	2.543	2.543	2.815	3.242	2.786	2.786
	III AP+0.8 m a	0.080	0.080	—	0.043	0.041	0.041
	以上 b	2.423	2.423	—	3.230	2.887	2.887
殻重量	I AP+0 m a	0.150	0.143	0.168	0.150	0.157	0.118
	~0.4 m b	2.713	2.886	2.701	2.753	2.753	3.081
	II AP+0.4 m a	0.141	0.244	0.176	0.132	0.155	0.155
	~0.8 m b	2.815	2.329	2.681	2.960	2.805	2.805
	III AP+0.8 m a	0.130	0.103	—	0.129	0.139	0.139
	以上 b	2.896	3.180	—	2.974	2.881	2.881

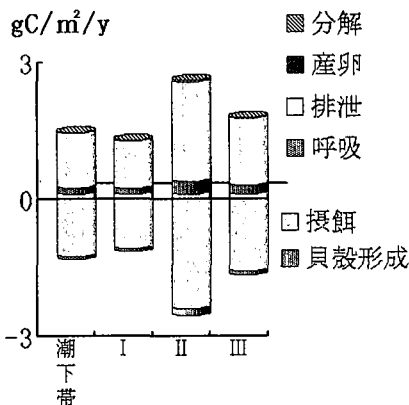


図-6 地盤高による炭素収支の特性

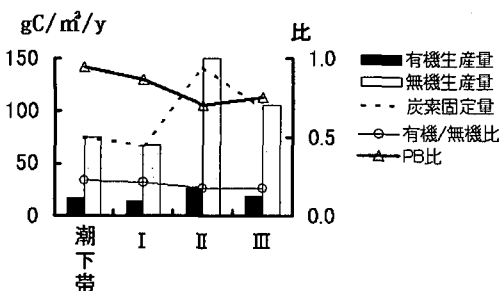


図-7 地盤高による炭素固定と生産量の特性

潮下帯については、AP+0 m~0.4 m の海域(表中の I)を適用し、夏季の AP+0.8 m 以上の海域については AP+0.4 m~0.8 m 帯のパラメータを用いた。潮間帯における餌料濃度の勾配については、盤洲干潟における POC 濃度の勾配(日本水産資源保護協会, 1992)を用いて設定した。炭素収支と生産力の地盤高による比較を図-6 及び図-7 に示す。

図-7 より、炭素収支から算出した炭素固定量及び生産力は、共に生物量の多い AP+0.4 m~0.8 m 帯で最大であった。一方、有機物の P/B 比(回転率)や有機生産量と無機生産量の比は地盤高の低い海域で大きくなった。以上のことから、潮間帯におけるアサリ個体群の生物機能は地盤高によって役割が異なり、地盤高の高い海域は生産力が大きく、摂餌による懸濁物除去機能が大きい一方で、CO₂生成量も大きい。これに対し、地盤高の低い海域は有機物の回転率が高く同時に生成する CO₂量が相対的に小さいため、有機物生産の機能が効率良く働いていることが示された。

6. 結 論

複数の年級群をもつ個体群の殻長組成や個体数を考慮できる炭素収支評価モデルを構築し、炭素収支の観点から盤洲海域でのアサリ個体群の生物機能を評価すること

を目的に本研究を行った。得られた結果を要約し、結論とする。①アサリ個体群の生物機能は年令によって異なる役割をもち、1 年貝は海域の有機物を体内に固定する機能が最大であり、摂餌による有機懸濁物の除去機能は 2 年貝が最大となる。②海域全体では、アサリ個体群によって年間 24.7 kt の炭素が固定、23.4 kt の炭素が排出される結果、差し引き年間 1.3 kt の炭素が固定される。また漁獲による炭素除去量は約 0.5 ktC であった。一方 CO₂生成量は最大で呼吸と貝殻形成量の合計 4 ktC/y に相当する。③炭素収支の季節変動は、夏季と春季に固定側が、冬季には排出側が上回る。このことは内部生産の活発な夏季に懸濁物除去機能の増大により、個体群に有機物が固定され、餌料の少ない冬季には個体群に貯留した炭素を海域に排出していることを示唆する。③個体の殻長-重量関係から、地盤高の高い海域は低い海域に比べて冬季~春季には身痩せし、秋季には丸型指数を反映して殻長に対する重量が大きくなる。これをモデル化した結果、生物機能は地盤高によっても役割が異なり、地盤高の高い海域は生産力と懸濁物除去機能が大きい一方 CO₂生成量も大きいのに対し、地盤高の低い海域は有機物の回転率が高く CO₂生成量は相対的に小さいため、有機物生産の機能が効率良く働いていることがわかった。

なお、本研究の一部は農林水産技術会議プロジェクト研究の一環として実施したものであり、盤洲干潟域のアサリ資源に関する貴重なデータをご提供頂いた関係漁協の方々、有意義な助言を頂いた鳥羽光晴博士に、こゝで謝意を述べる。

参 考 文 献

- 磯野良介 (1998): 東京湾盤洲干潟のアサリによる窒素摂取量の推定とその季節変動に係わる要因, 水環境学会誌, 第 21 巻, 第 11 号, pp. 751-756.
- 磯野良介・中村義治 (2000): 二枚貝による海水濾過量の推定とそれにおよぼす温度影響の種間比較, 水環境学会誌, 第 23 巻, 第 11 号, pp. 683-689.
- 柿野 純 (2000): 東京湾盤洲干潟におけるアサリの減耗に及ぼす波浪の影響に関する研究, 140 p.
- 小沼 晋・五島勇樹・中村由行 (2002): 成長モデルを用いた東京湾盤洲干潟での二枚貝による懸濁物除去量の推定, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1126-1130.
- 千葉水試 (2001): 平成 12 年度森林, 海洋等における CO₂収支の評価の高度化(地域重要資源の現地実態調査)委託事業報告書, 22 p.
- 鳥羽光晴 (1988): アサリ種苗生産試験 II-一秋季中間育成試験一, 千葉水試研報, 第 46 号, pp. 43-49.
- 中村義治・金網紀久恵・磯野良介・三村信男 (2001): 生活史に沿った二枚貝個体群の生物機能評価法, 海岸工学論文集, 第 48 巻, 土木学会, pp. 1231-1235.
- 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, 第 49 巻, 土木学会, pp. 1371-1375.
- (社)日本水産資源保護協会 (1992): 漁場保全機能定量化事業報告書, 249 p.
- 西沢 正・柿野 純・中田喜三郎・田口浩一 (1992): 東京湾盤洲干潟におけるアサリの成長と減耗, 水産工学, 第 29 巻, 第 1 号, pp. 61-67.