

養殖漁場 (アコヤガイ) における炭素固定機能の全国評価

中村 義治* ・ 関根 幹男** ・ 山口 毅***
湯浅 龍彦*** ・ 阿保 勝之**** ・ 三村 信男*****

わが国が誇る真珠養殖業を対象に、アコヤガイと環境水との間の炭素収支と炭素の固定・排出について、全国レベルでの評価を行った。アコヤガイによる年間の炭素排出量は 0.88 ktC、年間固定量は 0.94 ktC であり、軟体部には 0.04 ktC、貝殻部には 0.13 ktC が貯留される。貝殻形成により CO₂分圧が増加するが、太平洋中区の養殖漁場では年間の無機炭素生産量 0.03 ktC に対し、有機炭素生産量が 1.52 ktC に達し、海水中の CO₂分圧は閾値をはるかに下回り、大気への CO₂放出とはならないことを明らかにした。

1. はじめに

化石燃料の燃焼によって生成される地球温暖化ガス削減対策への取り組みが世界規模で開始され、あらゆる産業セクターにおいて削減方法が提案されている。そして、森林による CO₂吸収とともに、海洋の CO₂吸収能とリザーバーとしての役割が明らかにされてきた。海洋における炭素循環の研究において、生物を介したプロセスでは植物プランクトン等の藻類の機能の研究のほか、石灰化を行うことで海洋中の全炭酸を減少させている貝類やサンゴ類、フジツボ類などの生物による CO₂削減への効果が研究されてきた。

わが国沿岸域は漁業により高度に利用されており、貝類は漁業養殖業により年間約 80 万トン強の生産があり、大きな資源量を有している生物群である。貝類は自身の持つ生物機能と漁業養殖業の生産機能を通じて、沿岸域の炭素循環や CO₂吸収に大きな影響を与えていると考えられる。そして自然界の貝類に比べ高密度で育成されている養殖個体群は、炭素循環においても天然貝とは異なった影響を与えていると考えられ、養殖漁場における無機炭素生産量を正確に把握することが欠かせない課題となっている。

著者らはウバガイ個体群をはじめ、主要な貝類 8 種を対象に、成長段階別の代謝特性をモデル化した生物機能評価法を提案し、生息海域と個体群間の炭素収支を試算してきた(中村ら, 2001, 2002)。養殖貝は生育密度等環境に及ぼす要因の一部を人為的に制御されている。そこで人為の管理下におかれた養殖漁場における炭素循環と CO₂収支の解明が必要と考え、個体の代謝機能についての知見が蓄積されているアコヤガイによる炭素の固定・排出に関する評価を行ったので報告する。

2. 材料及び方法

(1) 計算対象

わが国におけるアコヤガイの養殖漁場は、西日本各地に分布し、その養殖形態は母貝養殖と真珠養殖とに大別される。母貝養殖は真珠養殖のためのアコヤガイを生産するための養殖で、採苗後 1 年ないし 1.5 年で真珠養殖業者に販売される。母貝を購入した真珠養殖業者はその後、2 年ないし 3 年かけてアコヤガイを育成し真珠を生産する。真珠の生産過程に即して炭素固定機能の評価するには、母貝養殖と真珠養殖の 2 段階を考慮すべきであるが、現存量の推計が可能な真珠養殖段階のアコヤガイを研究対象とした。したがって 1 歳ないしは 1.5 歳以下のアコヤガイによる炭素固定に関しては評価していない。

わが国の真珠生産地は日本海は福井県、太平洋岸では三重県を北限として 6 県に分布している。主要な真珠生産地は三重県、愛媛県、長崎県、熊本県、鹿児島県である。これらの生産地の漁場環境は、水温とクロロフィル a によって区分すると水産庁の大海区分に一致するので、計算にあたっては、図-1 に示すように、三重県を太平洋中区、愛媛県を太平洋南区、長崎県、熊本県、鹿児島県を東シナ海区の 3 海区に区分し評価した。

計算対象年は 1998 年とした。ただし母貝養殖業と真珠養殖業とも 1996 年より大量死に見舞われ、この被害は 1998 年にも発生した。このため計算対象年の 1998 年は大量死による有機物が環境に排出され、通常より有機炭素

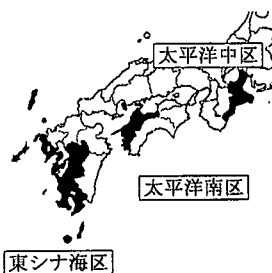


図-1 真珠養殖地と海区区分

* 水博 (独法)水産工学研究所 水産土木工学部長
** 正会員 日本海洋株式会社 環境調査事業部
*** 日本海洋株式会社 環境調査事業部
**** 農博 (独法)養殖研究所 生産システム部
***** 正会員 工博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

の排出が多かったと推察される。

(2) モデルの概要

評価に使用したモデルは、個体と生息環境（環境水）との間の炭素収支を生物の代謝機能を取り入れて作成し、時空間分布と发育段階に応じて出力することが可能である。著者らは、個体代謝に関わるモデルを阿保ら（2001）と中村ら（2001）、個体群動態モデル及び炭素収支モデルを中村ら（2001）をベースに若干の修正を加え使用した。個体成長（代謝）モデルは以下のとおり設定した。

a) 個体成長（代謝）モデルの基礎式

炭素収支を基本とした軟体部の成長過程を式（1）で定式化し、餌料環境として水温とクロロフィル a 量から換算した POC 濃度を与え、摂餌量より算出した同化量から軟体部の成長量を求めた後、軟体部重量と殻高の関係より殻高を算出する。

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

ここで W_c は軟体部炭素重量 (mgC), A は同化量 (mgC/day) で $A = F - E = F \cdot A_e$ で表し, F は摂餌量 (mgC/day), E は排泄量で $E = F(1 - A_e)$, A_e は同化効率で $A_e = a/(a + \text{Chl. a})$ である。Chl. a はクロロフィル a 量 ($\mu\text{g/l}$), R は呼吸量 (mgC/day), G は生殖腺への配分量 (mgC/day) である。

b) 摂餌量, 濾水量, 呼吸量

摂餌量は式（2）, 濾水量は式（3）, 呼吸量は式（4）で表した。

$$C = \text{POC} \cdot F_t \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (2)$$

F は摂餌量 (mgC/day), POC は懸濁態有機炭素濃度 (mgC/m³), F_t は濾水量 (l/day) である。

$$F_t = f_t(T) \cdot f_s(S) \cdot f_w(w) \dots\dots\dots (3)$$

ここで, $f_t(T)$, $f_s(S)$ はそれぞれ水温 (T , °C) と塩分 (S , psu) の影響を表す最大値 1 の無次元の関数, $f_w(w)$ は最適水温と塩分のもとでアコヤガイの大きさ（軟体部の乾重量）によって決まる濾水量 (l/day) である。それぞれは次式で表される。

$$f_t(T) = 2.568 - 0.5451 \cdot T + 0.03597 \cdot T^2 - 0.000667 \cdot T^3 \dots\dots\dots (3a)$$

$$f_s(S) = 1/(1 + \exp(-0.5353229(S - 23))) \dots\dots (3b)$$

$$f_w(w) = 2.11 \cdot W_o^{0.4513} \dots\dots\dots (3c)$$

呼吸量 (mgC/day) は水温と軟体部の乾重量によって表現し、次式で求めている。

$$R = 0.278 T^{2.4932} W_o^{0.75} \dots\dots\dots (4)$$

R は呼吸量 (mgC/day), T は水温, W_o は軟体部の乾

燥重量である。

c) 生殖腺と産卵

アコヤガイの成熟度指数 (GI) は伊藤 (1978) によって調べられた。しかし産卵に至るまでの有機炭素生産物の生殖腺配分様式は定式化されていない。近年のアコヤガイは、6 月頃産卵し、9 月に性成熟が開始され、成熟過程が従来と異なってきたという報告もある（内村 1996）。また和田 (1976) は水温 13°C 以下では成熟が生じないとしており、秋季に成熟が進んでも冬季間の成熟は停止する。本研究では、生殖腺への有機炭素配分は、夏季の産卵後、成熟が進まず越冬し、冬季の低水温期から性成熟が開始するとみなした従来のアコヤガイの成熟過程を定式化し、最低水温からの積算水温で生殖腺への配分を行った。産卵は産卵水温と最大 GI のいずれかに達したときに行うと考え、最低水温からの積算水温と当該時点の水温との比率で分配した式（5）で生殖腺の成長を表した。

$$\Delta G = (G_{\max, t-1} - G_t) T / \left(T_s - \sum_{j=1}^n T_j \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここで, $G_{\max, t-1}$ は $t-1$ 時の軟体部重量 (g) と GI で求めた最大生殖腺重量を炭素換算した最大生殖腺炭素重量 (mgC), G_t は t 時の生殖腺重量 (mgC), T_s は積算温度 (°C) で、産卵日を設定すると一義的に求まる。 $\sum T_j$ は t 時までの積算温度である。水温条件によっては同化量が生殖腺の成長を賄えない場合が生じる。このときは生殖腺の成長のために軟体部から有機炭素を供給した。このため軟体部が痩せる現象を組み込んでいる。

d) 成長

アコヤガイ貝殻の成長について、松井 (1965) は山口 (1955) の測定例を紹介し、8 歳で殻長 (高) 83 mm になっているとしている。その後育種技術の変化や中国産アコヤガイとの交配などによる形態変化が生じているので、本研究では三重県、愛媛県、熊本県、鹿児島県の水産試験場と真珠養殖漁業者の協力を得て、2002 年浜揚げ予定のアコヤガイのサンプルを入手し、松井 (1965) を参考に、沿岸環境調査マニュアルの方法に準拠して年齢を読み取り成長曲線を作成した。この成長曲線を代謝モデルの検証データとした。

e) 個体群動態モデルの基礎式

式（6）の資源変動方程式（中村ら, 1989）に基づき、月別・海区毎に真珠養殖漁場におけるアコヤガイの個体群動態を計算した。また、収穫に関しては、浜揚げ月に対象サイズ以上の個体をすべて取り上げるものとした。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial L} + M \cdot N = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここで, N は殻高別の個体数で時間 t と殻高 L によって決まる。 u は殻高の成長速度で個体成長（代謝）モデル

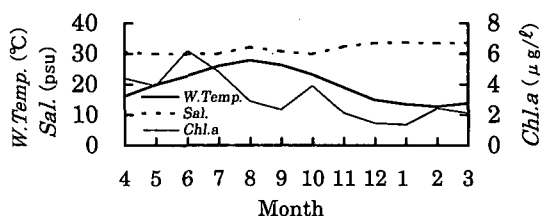


図-2 水温、塩分、クロロフィル a の月変化 (太平洋中区)

の計算結果から与えられる。 M は計算期間中の減耗率より算出した自然死亡係数である。

f) 環境データ

代謝モデルを駆動するために必要なクロロフィル a, 水温, 塩分の観測値を水産試験場, 公共用水域測定結果等を用いて整理し, 計算に供した。POC はクロロフィル a 量との関係式を用いて推定した。

図-2 に 1998 年の太平洋中区の計算に用いた水温, 塩分, クロロフィル a の季節変化を示す。このデータは 1997~1998 年の観測値を補完して作成したものである。

(3) 炭素収支

アコヤガイ個体群と個体群を取りまく環境水との炭素交換に関わる項目を, 排出項 (呼吸, 排泄, 産卵, 死亡貝の分解) と, 固定項 (摂餌, 貝殻形成) に分け, その差を収支として表した。この収支は月別・殻高別に集計した。

$$\frac{dC}{dt} = (R + E + G + D) - (F + P_c) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに, C は海域中の炭素量 (mgC), R は呼吸量 (mgC/day), E は排泄量 (mgC/day), G は産卵量 (mgC/day), D は死亡貝の分解量 (mgC/day) であり, 右辺第 1 の括弧内は環境水中に放出される炭素量の総計である。 F は摂餌量, P_c は貝殻形成量で, 第 2 の括弧内は環境水中から貝に移行する炭素量の総計である。

(4) 計算条件と初期条件

計算開始月を挿核作業後の沖出し月として 8 月, 産卵開始水温を 24.0°C , GI は最大値を 20% とした。初期資源量は, 各県の施術用具保有数から各海区で集計し, 太平洋中区 51,556,400 個体, 太平洋南区 56,227,500 個体, 東シナ海区 86,602,000 個体とした。また, 計算期間中の減耗率より算出した自然死亡係数は, 太平洋中区 1.05, 太平洋南区 1.39, 東シナ海区 0.83 と設定した。

3. 結 果

(1) アコヤガイの現存量

平成 10 年の漁業・養殖業生産統計年報 (農林水産省統計情報部) によれば, 当該年の真珠浜揚げ量は, 約 29 トンである。真珠のサイズ別浜揚げ量から逆算した真珠養殖母貝の在庫量 (生物量) は約 6 千トンと推定された。

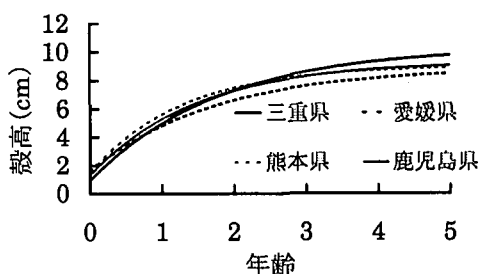


図-3 地域別のアコヤガイ成長曲線

三 重 県: $L = 10.29 \times (1 - \exp(-0.571 \times \text{Age} + 0.166))$

愛 媛 県: $L = 8.85 \times (1 - \exp(-0.588 \times \text{Age} + 0.33))$

鹿児島県: $L = 9.3 \times (1 - \exp(-0.69 \times \text{Age} + 0.217))$

熊 本 県: $L = 9.033 \times (1 - \exp(-0.788 \times \text{Age} + 0.227))$

ここで, L は殻高 (cm), Age は年齢である。

全国の現存量は 1.94×10^8 個体と推計した。真珠養殖場の分布面積は, 全国で約 21.5 km^2 , 個体密度は, 9.02 個体/ m^2 と推計された。

(2) アコヤガイの成長

図-3 に年齢と殻高の測定結果を Bertalanffy 成長曲線として示した。愛媛県を除き各地とも概ね成長曲線が同じ形を示した。これに対し愛媛県は, 1 歳以降の成長が劣っており, 高齢貝がやや小型のサンプルであった。

(3) アコヤガイ個体の代謝機能

個体成長 (代謝) モデルにより出力された結果を図-4

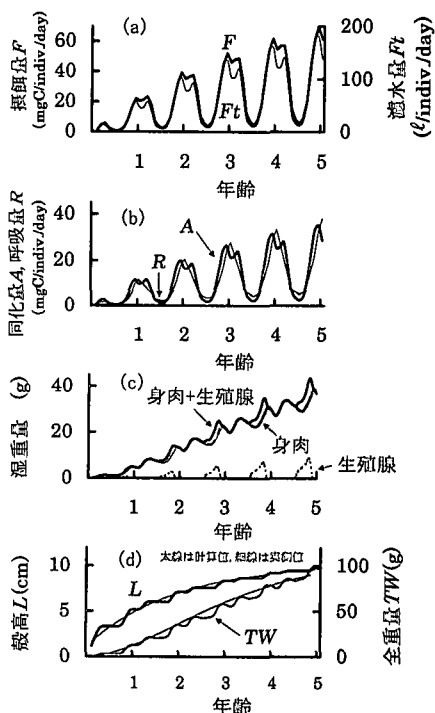


図-4 太平洋中区のアコヤガイの個体代謝機能

に示す。

濾水量と摂餌量 (a 図) は春季から秋季に増大し、冬季には著しく減少して代謝活動が低下する。これに応じて同化量や呼吸量 (b 図) も同じような周期的変化をしていることが再現されている。また、夏季の高水温及び冬季の低水温期には軟体部の増肉や貝殻形成は停止する。このような代謝過程を経て実現される殻高と全重量 (d 図) は観測値と良く一致し、代謝過程が再現されていると判断される。

(4) アコヤガイ個体群の生物機能評価

a) 海区別の炭素収支

海区別に見た場合、一年間の収支の大きさは、東シナ海区で最大で、排出側へ 0.43 ktC、固定側へ 0.46 ktC、次いで、太平洋中区で、排出側へ 0.25 ktC、固定側へ 0.25 ktC、太平洋南区で、排出側へ 0.20 ktC、固定側へ 0.20 ktC、の順となっている (図-5)。

b) 全国の炭素収支

全国における炭素収支は年間で、排出量 (呼吸、排泄、産卵、分解) が 0.88 ktC、固定量 (摂餌、貝殻形成) が 0.94 ktC となり固定量が排出量をやや上回る結果となった (表-1, 図-6)。これは、摂餌により年間 0.80 ktC (2.93 ktCO₂ 当量) の有機炭素が海水中から摂取され、このうち 0.46 ktC (1.69 ktCO₂ 当量) が同化 (摂餌-排泄)、0.04 ktC (0.15 ktCO₂ 当量) が純生産量 (摂餌-排泄-呼吸) として主に軟体部に貯留することを示している。

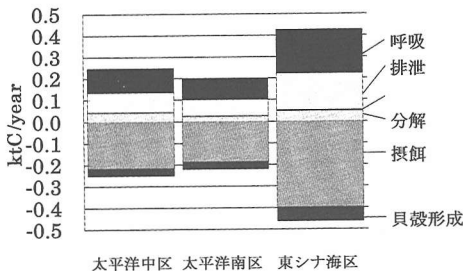


図-5 海区別にみた真珠養殖漁場の炭素収支

表-1 真珠養殖漁場における炭素収支

単位: ktC/year

	排出				固定			
	呼吸	排泄	産卵	分解	計	摂餌	貝殻形成	計
太平洋中区	0.12	0.09	0.0026	0.04	0.25	0.22	0.03	0.25
太平洋南区	0.10	0.08	0.0025	0.02	0.20	0.19	0.03	0.22
東シナ海区	0.21	0.17	0.0050	0.05	0.43	0.40	0.06	0.46
全国	0.42	0.34	0.010	0.11	0.88	0.80	0.13	0.94

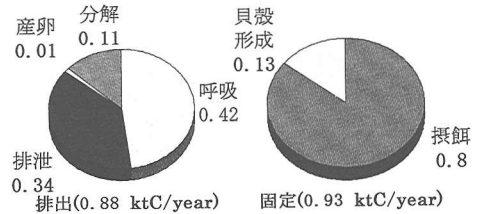


図-6 全国の真珠養殖漁場における炭素収支

4. 考 察

(1) 懸濁物の浄化機能

アコヤガイは水管を持たない貝で、呼吸・摂餌・産卵などのために貝殻の開閉運動を行って他の二枚貝と同じように、海水中から餌料や酸素を得ている。この貝殻運動によって濾過される有機懸濁物は、一時的に固形排泄物として底泥上に封じられると考えられる。

辻井・大西 (1957) や宮内 (1962) らは養殖適正密度を算定するために、間接法や直接法によってアコヤガイの濾過水量を調べた。直接法では排水腔を綿やゴムサックで塞ぎ濾過水を量っている。水温や比重、サイズにより濾水量が異なるが、水温 10°C 以下ではほとんど濾過せず、2 年貝では 24°C において 0.895 l/h、3 年貝で 22°C において 3.320 l/h、4 年貝で 24°C において 3.720 l/h の濾水量が計測されている。本モデルではこれらの成果を定式化して水温と体サイズの関数で濾水量を試算しており、アコヤガイの成長と個体群のサイズ組成を反映できるモデルである。漁場で濾過される総量を算出した。年間の全濾水量は 2 億 5 千万 m³、そして摂餌により年間 0.8 ktC に相当する有機炭素が水中から摂取され、環境水中の有機物を固定し、おおよそ 3~7 時間程度の遅れをもって底泥に排泄物を負荷している。

(2) アコヤガイ個体群を通じた炭素固定機能

アコヤガイ個体群と環境水との間の炭素収支は、固定量は 0.94 ktC/year、排出量が 0.88 ktC/year であった。年間固定量と年間排出量の差と年間固定量との比率は 0.063 であり、年間固定量の約 6% が正味の固定に回っているとみなせる。しかしその量はわずかに 0.06 ktC/year である。

貝殻形成に利用される炭酸類については体内で生成された二酸化炭素を消費するとする餌由来説の見解と海水中の炭酸類を利用するとする見解がある。ここではアコヤガイの貝殻形成は全て海水由来と考え、全炭酸の削減に寄与していることを指摘した。真珠養殖のアコヤガイの炭素固定機能のうち、貝殻による固定は 0.13 ktC/year であった。アコヤガイ貝殻には、代謝由来の炭素が最大 20% 含まれるとされることから、真珠養殖漁場にお

ける炭酸の削減は炭素ベースで毎年0.1 ktC/year程度に達すると評価した。貝殻を形成する炭酸カルシウムの溶解速度はわかっていないが、海水中では溶解速度が極めて遅いと考えられており、環境への回帰も非常に遅いと考えるとよい。さらに養殖漁場では、この貯留分はすべて陸上に上げられ、系外へ完全に固定される。CaCO₃として年間約1,000トンの埋没(化石化)相当量が期待される。

(3) 真珠養殖漁場におけるCO₂収支について

貝殻形成の過程で生成される水素イオンのために海水の炭酸平衡が移動し、CO₂分圧を高める働きをするので、貝殻形成は本来的にはCO₂の発生源となっている。実際のCO₂分圧はこの有機炭素と無機炭素(石灰化)の生産量の比や炭酸系の物質の条件によって変化する。海水中のCO₂濃度変化に直接影響する代謝機能は呼吸と石灰化に伴う分圧の上昇である。石灰化に伴うCO₂分圧への影響は、アコヤガイ個体群を取りまく環境水中の有機炭素と無機炭素の生産量比とその場の炭酸系の物質質量によって決定される。

アコヤガイの養殖漁場における有機炭素量の生産については調べていない。しかし、養殖漁場は高い有機物生産能力を持っているので、有機炭素生産は大きいと推定される。本研究のモデルとした三重県泉真珠湾における生産量は12.6 mgC/m³/h(三重県環境保全事業団1996)と測定されている。この値を用いて、太平洋中区の養殖場における養殖深度を平均4 mとして、年間生産量を求めると、1.52 ktC/yearである。さらにアコヤガイによる有機炭素生産量/無機炭素生産量比を求めると、50.7となり、有機炭素生産がはるかに大きい。炭酸ガス分圧の増減の閾値は1:1.16とされているので、養殖場ではCO₂分圧(PCO₂)が減少側にあることが予測される。

5. 結 語

本研究では、わが国が誇る真珠養殖業を対象に、真珠養殖漁場におけるアコヤガイと環境水との間の炭素収支とアコヤガイによる炭素の固定・排出について、全国レベルでの評価を行い炭素収支は年間わずかに固定側にあることを明らかにした。しかし、現存量が少ないこともあり、炭素の固定機能からみればホタテガイ等の生産量の大きな種類の機能に比べてわずかな効果しか期待できないことが明らかとなった。貝殻形成によるCO₂の分圧に対する影響は、アコヤガイ漁場の有機物生産量が非常に大きいので大気へCO₂を放出する方向には動かない。

すなわち植物プランクトン等の有機炭素生産がアコヤガイの無機炭素生産に比べてはるかに大きく、閾値を越えるような分圧に高まることはないと推察され、このため全炭酸を消費して炭酸を固定し、長期間にわたって貯留する効果に注目すべきであると考え、この評価をさらに確実なものにするには、アコヤガイ漁場におけるpHや炭酸ガス分圧、全炭酸、アルカリ度、有機物生産などの炭酸平衡に関わる指標の連続的な調査が必要である。

謝辞: 本研究を行うにあたり、三重県水産技術センター、愛媛県水産試験場、鹿児島県上村真珠(株)、熊本水産研究センターからはアコヤガイのサンプルを頂くとともに近年の養殖事情についての詳細をうかがった。ここに感謝の意を表す。なお本研究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。

参 考 文 献

- 阿保勝之・杜多 哲 (2001): アコヤガイの餌料環境に基づく養殖密度評価モデル, 水産海洋研究 65(4), pp. 135-144.
- 伊藤克彦 (1976): 異なる水温条件下におけるアコヤガイの酸素消費量ならびにアンモニア窒素排泄量と肉重量との関係, 国立真珠研報 20, pp. 2254-2275.
- 内村祐之 (1996): 三倍体アコヤガイ研究から明らかになったアコヤガイの改良指針, SHINJU けんきゅう, No. 3, pp. 53-61, 真珠新聞社, 東京.
- 桑谷幸正 (1965): 炭素粒子投与によるアコヤガイの摂餌機構の解明, 日本誌, 31(10).
- 辻井 禎・大西侯彦 (1957): アコヤガイの濾過水量及び捕食の実験的研究, I. 濾過水量について, 真珠研報, 3, pp. 194-200.
- 中村義治・平山信夫・秋元義正 (1989): 動的モデルによるウバガイ資源変動の解析方法, 日本誌, 55 巻, 第 3 号, pp. 417-422.
- 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, 海工論文集, 48 巻, pp. 1231-1235.
- 沼口勝之 (1994): アコヤガイのろ水率に及ぼす水温の影響, 水産増殖, 42(1), pp. 1-6.
- 農林水産技術会議 (2001): 貝類によるCO₂固定量評価のための主要個体群の動態に関わる調査, 森林, 海洋等におけるCO₂収支の評価の高度化平成12年度研究報告.
- 松井佳一 (1965): 真珠の辞典, p. 225, 北隆館, 東京.
- 宮内徹夫 (1962): アコヤガイ濾過水量 I, 日周性について, 水産増殖 9(4), pp. 201-206.
- 宮内徹夫 (1962): アコヤガイ濾過水量 II, 濾過水量に及ぼす水温と比重の影響, 水産増殖 10(3), pp. 7-13.
- 三重県環境保全事業団 (1996): 内湾環境保全計画策定業務水質予測及び保全計画報告書, p. 109.
- 山口正男 (1955): アコヤガイの養殖とその真珠, 水産増殖叢書, No. 9.
- 和田克彦 (1976): 採卵成績の年変動などから見たアコヤガイの成熟と積算水温の関係. 国立真珠研報, 20, pp. 2244-2253.