

アコヤガイ代謝モデルと低次生態系モデルを統合した 英虞湾の海域環境シミュレーション

上 野 成 三*・高山百合子**・灘 岡 和 夫***・勝 井 秀 博****

1. はじめに

全国各地の養殖漁場では、海底のヘドロ化や赤潮の慢性化などの漁場老朽化が進行し、養殖水産物の病害や斃死が増え生産性が低下している。漁場の老朽化を防ぎ持続的な養殖事業を行うには、漁場全体の生産力や浄化力に基づいた自然調和型の漁場管理を行う必要がある。しかし、長らく自由競争的に海域を利用してきた漁業者にとって、漁場全体の管理方法を策定し合意形成を得ることは困難な課題である。この課題解決には、誰もが納得できる科学的な情報に基づいて漁場の全体管理が検討できるツールが必要であり、漁場環境や養殖資源量が予測可能な数値モデルの開発が求められている。

この分野ではカキ養殖のモデル開発が進んでおり、水温・塩分・水質などの環境情報を既知としてカキの成長を予測するもの(Powell ら, 1992)、カキ養殖量は既知として赤潮や貧酸素化などの水質変化を予測するもの(片岡ら, 1998)がある。しかし、実際の養殖漁場では、生産性を上げるために養殖量を増やした結果、餌不足や底泥汚濁を引き起こし生産性が逆に低下するという自家汚染問題が生じており、養殖過程と環境過程の相互作用を考慮したモデルが必要となっている。これを受けて、水産庁養殖研では、新たに開発したアコヤガイ成長モデルと餌料生物動態モデルを統合し、餌環境と貝の相互作用が考慮できる先駆的なモデルを開発した(阿保・杜多, 2000)。

本研究では、真珠養殖が盛んな英虞湾を対象として、養殖研モデルを基本に排糞や貝殻成長のプロセスを加えたアコヤガイモデルを開発し、3次元流動・低次生態系モデルと統合して、流動・水質・底質・アコヤガイ成長量が予測可能な海域環境シミュレーションを構築した。計算結果は英虞湾の大規模調査結果(上野ら, 1999a, 2000a, 2000b)と比較検証し、計算精度やモデルの問題点を明らかにした。さらに、養殖量の増減によるアコヤガイの成長、水質・底質変化の予測シミュレーションを

行い、適正養殖量の算定に向けた基礎検討を行った。

2. 海域環境シミュレーションの構築方法

(1) 低次生態系モデル

低次生態系モデルはデルフト水理研が開発した Delft 3D-waq を用いて構築した。本モデルの構成を図-1 に示す。計算要素は植物プランクトン、溶存酸素、栄養塩類などで、植物プランクトンの増殖・死滅・光合成、有機物の分解、脱窒、硝化、粒子状物質の沈降、底泥の有機物分解、底泥からの栄養塩の溶出など主要なプロセスを網羅した。計算グリッドと境界条件を図-2 に示す。低次生態系モデルで用いる流れ・水温・塩分のデータは Delft 3D-flow により構築した流動モデルの結果を用いた。本流動モデルは、外部潮汐・内部潮汐・気象の時間変化データを外的条件として与え、内部潮汐の湾内侵入も含めた動的な現象を再現した(上野ら, 1999b)。低次生態系モデルでは、流動モデルのグリッド(水平 1000 グリッド×鉛直 20 層)を統合して、水平 500 グリッド・鉛直 5 層のグリッドを用いた。

(2) アコヤガイモデル

阿保・杜多(2000)はアコヤガイの同化、呼吸、再生産の各プロセスを定式化し、植物プランクトン、水温、塩分を環境変数として貝の成長が計算できる数値モデルを開発した。本研究では、このモデルに排糞と貝殻成長のプロセスを追加することにより、貝のろ水による植物プランクトン・溶存酸素の減少に加えて、貝の排糞によ

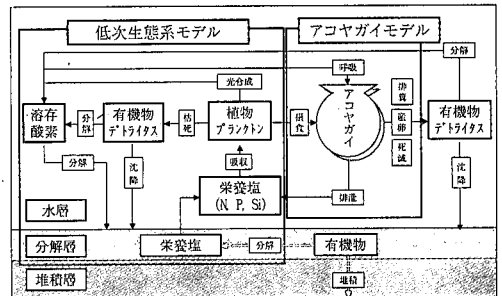


図-1 低次生態系・アコヤガイの統合モデル

* 正会員 工修 大成建設(株)技術センター土木技術研究所
** 正会員 大成建設(株)技術センター土木技術研究所
*** フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 情報理工学研究所
**** フェロー 工博 大成建設(株)技術センター土木技術研究所 部長

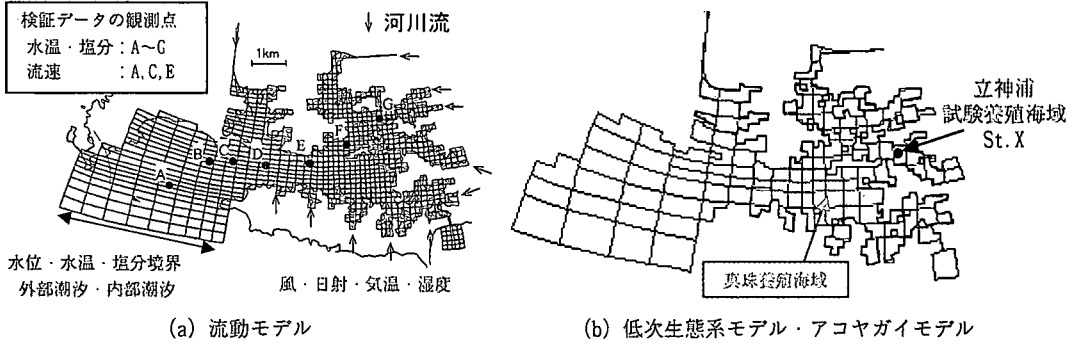


図-2 計算グリッドと境界条件

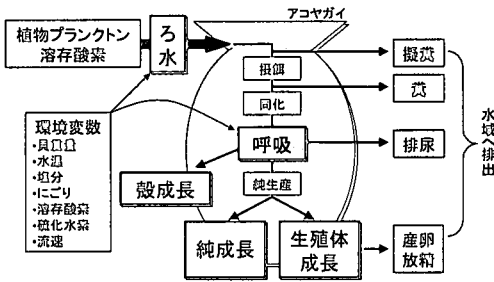


図-3 アコヤガイモデルの概念図

る底泥の有機汚染の進行や、真珠の品質に参考となる貝殻の成長度が考慮できるモデルに改良した。具体的には、まず、ろ水により植物プランクトンが体内に取り込まれ、残りは糞として排出され、次に、呼吸により同化分の一部が消費され貝殻の成長と排尿に回り、残りが貝の軟体部に使われるという過程をモデル化した(図-3)。また、最近、高水温に強く斃死の少ない中国産系の貝が増えつつあることから、本モデルのパラメータ設定には極力中国産系の貝のデータを用いた。

アコヤガイの成長は、ろ水による摂食分の同化量から呼吸・産卵により消費量を引いたもので求められるとし、その基礎式を次式のように定義した。

$$dBW_d/dt = \gamma_c \cdot e \cdot FR \cdot C_{food} - \gamma_{o_2} \cdot Rsp - \gamma_c \cdot Rpr \quad (1)$$

ここで、 BW_d は貝の軟体部の乾燥重量(gDW/個)、 e は同化効率、 FR はろ水速度 (m^3 /日個)、 C_{food} は餌濃度 (gC/m^3)、 Rsp は呼吸速度 (gO_2 /日個)、 Rpr は再生産速度 (gC /日個) で、 γ_c 、 γ_{o_2} は軟体部乾燥重量と炭素重量、酸素分子重量の比で、各々2.5、0.94とした。

各プロセスの定式化を以下に述べる。二枚貝のろ水速度 FR は、 BW_d のべき乗で表され水温 T と塩分 S の影響を受けることから (Dame, 1996)、次式により定義した。

$$FR = a \cdot BW_d^b \cdot FR_{T_s} \cdot FR_{S_s} \quad (2)$$

ここで、 a 、 b はろ水速度の定数で、中国産アコヤガイのデータ (愛媛水試, 1999) を参考に、 $a=0.1$ 、 $b=1$ と設定した。 FR_{T_s} 、 FR_{S_s} はろ水速度に対する水温・塩分の影響関数で、水温が $25^\circ C$ 付近で最大のろ水速度となること (宮内, 1962; 沼口, 1994; 山元ら, 1996)、塩分が 25 psu 以下になるとろ水速度が急速に低下すること (宮内, 1962) の研究結果を参考にして次式で定義した。

$$FR_{T_s} = \max[0, \cos\{(T-25)/25 \cdot \pi\}] \quad (T \leq 25^\circ C) \\ = \max[0, \cos\{(T-25)/15 \cdot \pi\}] \quad (T > 25^\circ C) \quad (3)$$

$$FR_{S_s} = \min[1, 1 + (S-25)/25] \quad (4)$$

同化効率 e は伊藤 (1978) によると 20% から 80% と変動が激しい。本モデルでは実測値との一致度が高まる値として 65% とした。

呼吸速度 Rsp について、伊藤 (1976) は酸素消費量と貝の肉重量・水温の関係を調べ実験式にとりまとめている。本モデルでは、この実験式を高水温で呼吸速度が飽和する関数形に変更した次式を用いた。

$$Rsp = \max(4.838 \times 10^{-6} \cdot T^{2.636} \cdot BW_d^{0.941}, 30 \cdot BW_d^{0.941}) \quad (5)$$

呼吸に伴う貝肉質の有機物分解、排尿は酸素消費量に炭素酸素比 0.375、窒素炭素比 0.167、リン炭素比 0.020 を乗じて求める。なお、式 (5) は伊藤 (1978)、山元 (1998) が指摘した貧酸素化による酸素消費量の低下を考慮できない。今後、酸素の影響関数の導入が必要である。

産卵について、従来の国産種は 5 月から 7 月に産卵期を持つが、中国産系の貝は産卵期が明確でなく一年を通して生殖腺を保持する。そこで、再生産速度は同化速度の 10% とし、季節変化しない一定値を与えた。

$$Rpr = 0.1 \cdot e \cdot FR \cdot C_{food} \quad (6)$$

排糞速度 Exc はろ水による摂餌速度から同化速度を

引いたものとし、次式で定義した。

$$Exc = (1 - e) \cdot FR \cdot C_{food} \dots\dots\dots (7)$$

貝殻の成長には、餌料由来の有機炭素が使われ石灰化速度は呼吸速度に連動することから(和田, 1999), 貝殻の成長の基礎式を次式で定義する。

$$dSW_D/dt = \gamma'_0 \cdot \alpha \cdot Rsp \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 SW_D は貝殻乾燥重量 (gDW/個)、 γ'_0 は炭酸カルシウムと酸素の重量比 0.12 である。 α は呼吸により無機化される炭素量が貝殻石灰化に使われる割合で、本モデルでは、実測値の一致が最も高まった値として、 $\alpha = 1$ とした。しかし、これは、呼吸で無機化される炭素量の全てが貝殻石灰化に使われるという非現実的な条件であり、今後の改良を要する課題である。

(3) アコヤガイモデルと低次生態系モデルの統合

低次生態系モデルにアコヤガイモデルを統合し連成計算を行う数値シミュレーションを構築した。本シミュレーションにより養殖が海域環境へ及ぼす影響として、貝のろ水による海中の植物プランクトンの減少、呼吸による海中の溶存酸素の低下、排尿による海中のアンモニア・リン酸の増加、排糞による底泥の有機物の増加などが考慮できる。ただし、糞の沈降速度は約 6 m/分と大きいことから、糞の沈降過程は考慮せず、排糞は直接底泥の汚濁負荷になるものとした。上記の養殖による環境影響は低次生態系モデルを介して、餌量・水質の変動を引き起こし貝の成長に影響を及ぼす。

以上より、海域環境と養殖過程の相互作用を考慮した上で、流動・水質・底質・アコヤガイの変動が予測可能な海域環境シミュレーションが構築できた。本シミュレーションの再現精度を検証するために、アコヤガイ 2000 個体を用いた試験養殖と水質計測の同時観測 (1999 年 5 月 1 日から 12 月 10 日まで) の再現計算を行った。

3. 海域環境シミュレーションの検証

(1) 低次生態系モデル

低次生態系モデルの再現精度を検討するために、立神浦 (St. X) における水温 T (2 m 層)、植物プランクトン (2 m 層)、溶存酸素 DO (海底上 1 m 層) の経時変化を観測値と計算値と比較する (図-4)。 T に対する観測値と計算値の一致度は高く、本流動モデルの再現精度は良好である。これに対して、植物プランクトン、DO は、通年の全体変化の再現性は良好であるものの、数日程度の短周期変動の再現性は低下した。DO の再現精度が低下した原因としては、短周期変動の主要原因である内部潮汐の伝播時期が観測値と計算値で多少ずれることが上げられる。観測値の植物プランクトンの短周期変動には鋭い

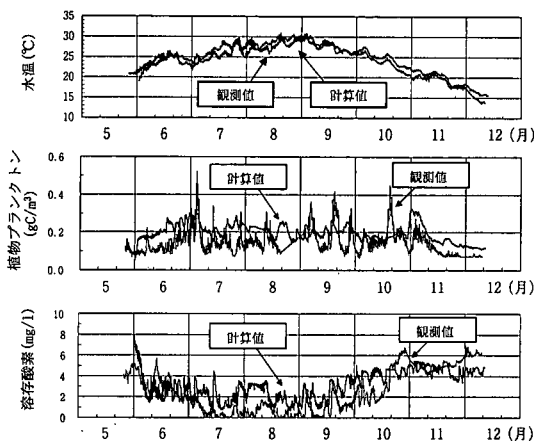


図-4 水温・植物プランクトン・溶存酸素の再現性

ピークが生じたのに対して、計算値のピーク値は全体的に低くなる傾向にある。この時、計算では栄養塩濃度が低下し、植物プランクトンは栄養塩不足により増殖阻害を受けていた。一方、現地海域では、顕微鏡観察により渦鞭毛藻類が卓越していたことが確認されており、渦鞭毛藻類が鉛直運動を行うことにより底層の栄養塩を獲得して増殖していたと考えられる。本モデルでは渦鞭毛藻類の鉛直運動を考慮しておらず、原理的に本現象を再現することができない。今後の課題と言える。

以上より、低次生態系モデルにより、一年を通じた全体変化の再現精度は良好であるものの、数日の短周期変動の再現は改良の余地が多い。特に、内部潮汐の伝播特性、植物プランクトンの種構成のモデル化などが課題である。

(2) アコヤガイモデル

アコヤガイモデルの再現精度を検討するために、立神浦 (St. X) での植物プランクトン、 T , S の観測値を環

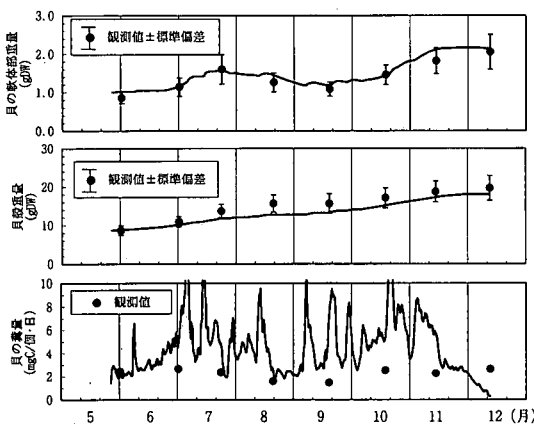


図-5 貝軟体部重量・貝殻重量・糞量の再現性

境変数として、貝の軟体部重量、貝殻重量、糞量を計算した結果と観測値を比較する(図-5)。本モデルにより、軟体部重量の特徴である8~9月の重量減少が良好に再現できた。また、観測値に比べて、計算された貝殻重量はやや小さく、糞量はやや大きいものの、通年の変化傾向の一致度は良好である。

以上より、本モデルによりアコヤガイの成長過程を良好に再現できることが確認できた。しかし、各種のパラメータは観測値に合うように設定したものであり、今後、合理的な設定方法が求められる。さらに、本モデルでは、アコヤガイの大量斃死の直接的な原因である有害赤潮や病害の影響が考慮できない。今後の改良課題である。

4. 養殖量の増減による環境変化予測シミュレーション

低次生態系モデルとアコヤガイモデルを統合した海域環境シミュレーションにより、英虞湾の真珠養殖量を増減させた場合の水質・底質・アコヤガイ成長量の予測計

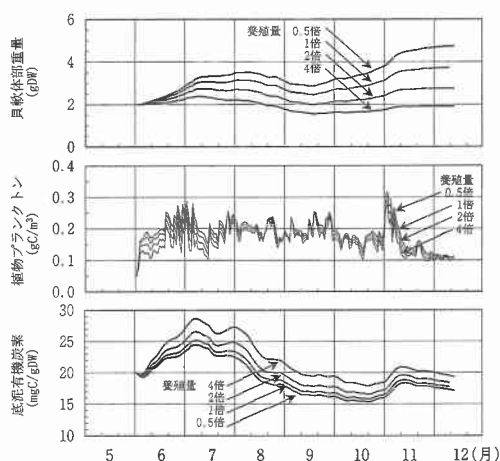


図-6 貝軟体部重量・植物プランクトン・底泥有機炭素の変化予測

算を行った。養殖量が現状の0.5倍、1倍、2倍、4倍の4ケースについて、英虞湾全体で平均した貝の軟体部乾燥重量、立神浦(St. X)の植物プランクトン(表層)と底泥の有機炭素量の経時変化を図-6に示す。養殖量が増大すると、植物プランクトンが減少、底泥の有機炭素が増加、貝の成長が鈍化する傾向となった。養殖量が大きくなると、英虞湾で生産可能な植物プランクトン量に対して貝による摂餌量が多くなり、植物プランクトン量が著しく減少する。そのため、アコヤガイは慢性的な餌不足状態になるので、多大な成長阻害が生じる結果となった。また、養殖量の増大により底泥汚濁が進行することは明らかで、その結果、貧酸素化や有害赤潮が発生し、貝の成長阻害に繋がると考えられる。アコヤガイの成長度の平面分布を図-7に示す。成長度は初期の重量と最終重量の比と定義した。養殖量が現状の0.5倍と少ない場合、養殖域全体で高い成長度が達成されるのに対して、養殖量が1倍、2倍と増大するにつれて、養殖域全体で成長度が低下する。特に、枝湾の奥部の成長度が著しく低下することから、海水交換の少ない湾奥部では過密養殖による餌不足が深刻化しやすいことが分かる。

英虞湾全体で平均した成長度と養殖量の関係を図-8に示す。養殖量の増加に伴い貝の成長度が低下する明確な関係が示された。特に、養殖量を現状より減少させれば貝の成長度が急激に増大することから、適正養殖量に基づいた漁場利用を行えば、貝の成長が高まり真珠の質が高められる可能性を示している。

以上より、本シミュレーションにより、養殖量の増大によるアコヤガイの成長阻害、植物プランクトン量の減少、底質汚濁の進行が定量的に評価できた。しかし、計算の予測精度は実用レベルに達していないことから、本計算結果の解釈は定性的・相対的なレベルに限定したい。今後、計算精度の向上に伴い、適正養殖量に対する定量的な議論が可能になると期待される。

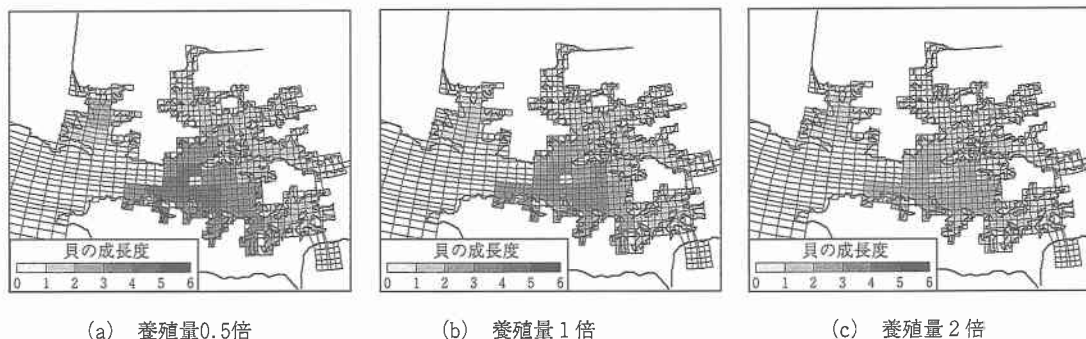


図-7 貝の成長度の平面分布の予測

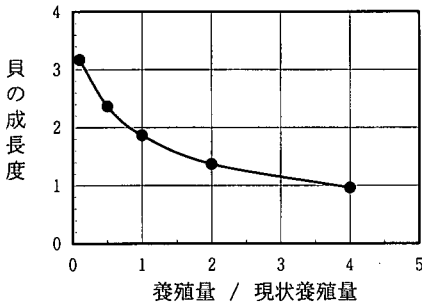


図-8 貝の成長度と養殖量の関係

5. 結 論

本研究の主要な結論を以下に示す。

- ①養殖研のモデルを基本に排糞と貝殻成長のプロセスを加えたアコヤガイモデルを開発した。本モデルにより貝の成長や糞量が良好に再現できた。パラメータの合理的な設定、有害赤潮・病害のモデル化が課題である。
- ②低次生態系モデルによる植物プランクトンや溶存酸素の再現精度について、通年の全体変化は良好であるものの、数日の短周期変動は低下した。今後、内部潮汐の伝播、植物プランクトンの種構成が課題である。
- ③低次生態系モデルとアコヤガイモデルを統合した海域環境シミュレーションを開発した。本シミュレーションにより、養殖量が増大すると、植物プランクトンが減少、底泥有機物が増大、アコヤガイの成長が鈍化する定量的な関係が示された。

謝辞：本研究は農林水産新産業技術開発事業「水産養殖海域の水質汚染を予防する環境管理エキスパートシステムの開発」の成果である。アコヤガイモデルの開発では水産庁養殖研究所（当時）の杜多哲氏、阿保勝之氏から貴重な助言を得た。現地調査では立神真珠研究会の原条誠也氏、鈴木孝夫氏、芙蓉海洋開発株式会社の菊池昭氏、松岡正敏氏から多大な協力を得た。ここに謝意を表

す。

参 考 文 献

- 阿保勝之・杜多 哲 (2000): アコヤガイ適正養殖量算定のためのモデル開発, 適正養殖量算定のためのモデル開発—現状と展望—, 水産庁中央水産研究所報告, pp. 31-42.
- 伊藤克彦 (1976): 異なる水温におけるアコヤガイの酸素消費量ならびにアンモニア態窒素排泄量と肉重量との関係, 国立真珠研究所報告, Vol. 20, pp. 2254-2257.
- 伊藤克彦 (1978): 英虞湾真珠漁場におけるアコヤガイの栄養環境について, 国立真珠研究所報告, Vol. 22, pp. 2363-2381.
- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・勝井秀博 (1999a): 水質環境の動的変化に着目した英虞湾の現地観測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1051-1055.
- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・勝井秀博 (1999 b): 内部潮汐を考慮した英虞湾の流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 466-470.
- 上野成三・灘岡和夫・片倉徳男・勝井秀博・山田二久次 (2000a): 英虞湾の真珠養殖漁場における底泥の汚濁流動層に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1046-1050.
- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・勝井秀博・山田二久次 (2000b): 英虞湾の真珠養殖漁場におけるアコヤガイの成長過程と汚濁負荷に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1206-1210.
- 愛媛県水産試験場 (1999): 平成 11 年度高品質アコヤガイ育成促進事業報告書, 27 p.
- 片岡真二・田中昌広・小林英一・小島 洋・Marinus Bokhorst (1998): 大船渡湾における流況・水質の現状再現と養殖カキの役割について, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1006-1010.
- 沼口勝之 (1994): アコヤガイのろ水率におよぼす水温の影響, 水産増殖, Vol. 42, No. 1, pp. 1-6.
- 宮内徹夫 (1962): アコヤガイの濾過水量, II 濾過水量におよぼす水温と比重の影響, 水産増殖, Vol. 10, No. 3, pp. 7-13.
- 山元憲一・安達 智・河渡 博 (1996): アコヤガイのろ水量の直接測定法, 水産大研報, Vol. 44, pp. 189-194.
- 山元憲一 (1998): 貝類呼吸機能の低酸素応答, 月刊海洋, Vol. 30, No. 3, pp. 133-138.
- 和田浩爾 (1999): 真珠の科学—真珠のできる仕組みと見分け方—, 真珠新聞社, 336 p.
- Dame, R. F. (1996): Ecology of marine bivalves: an ecosystem approach, Marine science series, CRC Press, 254 p.
- Powell, E. N., E. E. Hofmann, J. M. Kilnck and S. M. Ray (1992): Modeling oyster populations I. A commentary on filtration rate. Is faster always better?, J. Shellfish Res., Vol. 11, No. 2, pp. 387-398.