カキ養殖の実施形態別有機物負荷特性の評価

川口 修,^{1*} 平田 靖,¹ 若野 真,¹ 山本民次,² 陸田秀実³

(2011 年 4 月 4 日受付, 2011 年 8 月 5 日受理)

¹広島県立総合技術研究所水産海洋技術センター, ²広島大学大学院生物圏科学研究科,³広島大学大学院工学研究院

Evaluation of organic matter load in different methods of oyster culture

OSAMU KAWAGUCHI,^{1*} YASUSHI HIRATA,¹ MAKOTO WAKANO,¹TAMIJI YAMAMOTO² AND HIDEMI MUTSUDA³

¹Fisheries and Marine Technology Center, Hiroshima Prefectural Technology and Research Institute, Kure, Hiroshima 737-1207, ²Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8511, ³Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8511, Japan

Using a numerical model, organic matter load from oyster culture was estimated for different culture methods called “Yokusei”, “Ikisu” and “Nokoshi” conducted in Etajima Bay, Japan. Annual total organic load from oyster culture was 13.5 kg P $\text{eta}^{-1} \text{d}^{-1}$, of which “Yokusei” contributed the most. On the other hand, the organic load of “Nokoshi” was 1.5 times higher than that of “Yokusei” on the basis of a unit raft. Judging from its highest value of load/production ratio, “Nokoshi” is an environmentally stressful culture method.

キーワード：江田島湾, カキ養殖, 実施形態, 数値モデル, 有機物負荷

瀬戸内海の広島県沿岸では、マガキ *Crassostrea gigas* (以下、カキ) の養殖が古くから盛んに行われてきた。現在、この海域で行われているカキ養殖は、竹製の筏の下にカキの幼生を付着させたホタテガイ *Patinopecten yessoensis* の殻 (コレクター) を針金に通して吊り下げる垂下式養殖が主流である。この手法の特徴は漁場を立体的に利用できるため、集約的にカキを養殖できることである。垂下式養殖が普及し始めた 1955 年以降からカキの養殖量は飛躍的に増加した。また、1970 年頃から、夏の高水温を回避するための深吊り技術の導入や、夏と冬で筏を移動させるという養殖技術の改良が加えられ、1980 年代には生産量が約 30,000 t で安定していた。¹⁾ しかしながら、その後、1992 年から 1998 年まで *Alexandrium tamarense* の発生を原因とする貝毒によって出荷自主規制が実施されたことや、1996, '98, '99 年に *Heterocapsa circularisquama* 赤潮によるカキの大量斃死が発生したことによって、生産量は 2000 年までに約 20,000 t にまで減少した。²⁾ しかし、その他に間接的な要因として過密な養殖による漁場環境の悪化が以前から

指摘されるとともに、³⁾ 近年では、長期間養殖を行う生産体系の増加による漁場環境の悪化による生産性の低下も示唆されている。²⁾

カキ養殖は、魚類養殖とは異なり、餌を与えることなく、天然の植物プランクトン等を摂食させ、食用牡蠣として獲り上げる産業である。そのため、巨視的にみれば海水中の富栄養化を招く窒素やリンを取り除く営みであると考えられる。しかしながら、集約的に生産が行われる垂下式養殖では、カキ筏から排出される糞等の有機物が、カキ筏下の海底に局所的に負荷される。有機物負荷が過剰の場合、有機物の酸化分解にともなう底層の貧酸素化や海底泥の還元化を招くことにつながる。⁴⁾ このような漁場環境の悪化はカキの生産のみならず、他の水産資源への悪影響についても懸念されるため、底生生態系に悪影響を及ぼさない程度の有機物負荷範囲での養殖強度が望まれる。この観点で、有機物負荷を定量化し、適正なカキ養殖レベルを見積もることが重要である。

垂下式養殖では、カキの産卵期である 7~8 月にコレクターを海に垂下し、幼生を付着させる (採苗)。その

* Tel : 81-823-51-2171. Fax : 81-823-52-2683. Email : o-kawaguchi88559@pref.hiroshima.lg.jp

後、潮間帯に移動させ、弱い稚貝の淘汰や種苗の確保を目的として一日に数時間干出させる（抑制）。その後、養殖海域に移動させて成長させた後（本垂下）、収穫を行う。近年では、この抑制期間、本垂下期間が多様化しており、主に「イクス」、「ヨクセイ」、「ノコシ」の3つの養殖実施形態が採用されている。イクスでは1~2ヶ月間抑制した後、9月頃から本垂下を行い、翌年の12月頃から収穫する。ヨクセイでは5~10ヶ月間抑制した後、1月頃から本垂下し翌々年の4月頃から収穫する。また、ノコシは、ヨクセイのうち収穫を遅らせて10月頃から収穫するものをいう。よって、ヨクセイ、イクスは約15ヶ月、ノコシは約21ヶ月間本垂下される。これら養殖実施形態の違いによって、養殖時期と期間が異なるため、カキ筏から海底への有機物負荷量は異なると考えられる。そのため、環境に配慮した適正なカキ養殖量を見積もるには、これら養殖形態毎に海底への負荷量を把握する必要がある。カキ筏から海底への有機物負荷量については、これまで広島湾⁵⁾や奥の内湾⁶⁾における先行研究はあるものの、養殖実施形態別に詳細な見積もりがなされたことはない。

江田島湾は、江田島、西能美島に囲まれた閉鎖性が強く（Fig. 1）、常に平穏な海域である。そのため、様々な筏上作業や、台風時の避難のため、夏季には広島湾から多くのカキ筏が移動し、高密度で養殖される。このようなことから、高密度のマガキ養殖に起因すると考えられる底層の貧酸素化が常態化して問題となっている。⁷⁾そこで、本研究では、江田島湾をモデル海域とし、カキ養殖からの有機物負荷量を養殖実施形態別に調査すると

ともに、数値モデルを構築し、これにより有機物負荷量を算出し、健全な環境を保全しつつ持続的にカキ養殖が行える状況を提案することを目的とした。

方 法

カキ筏現存量調査 2007年8月、2008年3、6、9、12月、2009年3月に、江田島湾内のヨクセイ、ノコシ、1年目のイクス、2年目のイクスおよびカキが垂下されていない空の筏を、船上から目視により判別しながら計数した。また、その時期の養殖作業工程（新規垂下、収穫の順序、スパーサー通し換え作業、筏移動）に合わせてそれぞれの台数を未測定月に対して補間することで、それぞれの養殖形態別の月毎の筏台数を推定した。ただし、この時、ヨクセイは将来いつ収穫されるか不明である。そのため、ヨクセイは将来ノコシとして収穫されるものも含み、ノコシはヨクセイとしての養殖期間以降のもののみを指す。

カキ現存量調査 2007年8、9、12月、2008年3、5、8、11月、2009年2月にヨクセイ、イクス、ノコシごとに筏の両端部、中央部の3箇所からカキの連を引き上げ、垂下水深のおよそ中間付近のコレクターを回収した。その後、カキの個体数と個体ごとの軟体部湿重量を測定し、1つのコレクターあたりの平均値を求めた。これに、筏にある総コレクター数（688個）を乗じることによって、それぞれの筏における養殖カキの現存量を見積もった。また、カキ軟体部を80℃で恒量になるまで乾燥させた後、養殖形態別に家庭用のミル&ミキサー（NB-552L、仲佐）で磨砕混合し、JIS法による全リン測定法（JISK0400-46-40）を一部改変した以下の方法によって粒状態リン（PP）の分析を行った。すなわち、適量（約10mg）のサンプルをテフロン製分解容器に入れ、5%過硫酸カリウム8mLを加えた後、120℃で2時間加圧熱分解した。その後、適宜超純水（MQ）で希釈して栄養塩自動分析装置（BLTEC AACs4）で溶存態無機リンを分析することにより定量した。

カキ筏からの沈降物調査 2007年8、9、12月、2008年3、5、8、11月、2009年2月に、オイスタープレート（直径198cmの枠に2cm四方のメッシュ底、旭化成マリンテック）を各養殖形態の筏の直下に7日間垂下した。回収し、オイスタープレート上の落ちカキやその他の大型の沈降物を採取した。その後、落ちカキの表面を丁寧にブラシで洗浄し、この洗浄液と落ちカキ以外の大型沈降物をまとめて80℃で乾燥させた（以下、沈降付着物）。これを家庭用のミル&ミキサー（上述）で磨砕混合した後、カキ現存量調査と同様にPPの分析を行った。同様に、落ちカキの軟体部（以下、落ちカキ）も80℃で乾燥させた後PPを定量した。また、オイスタープレートの回収時にセディメントトラップ（直径

Fig. 1 Location of Etajima Bay and study area.

100 mm, 塩化ビニール製パイプ) をカキ筏直下に垂下した。24 時間後にこれを回収し (以下, 微小沈降物), 上澄みを捨てて定量した後, あらかじめ MQ で煮沸洗浄したニトロセルロース製フィルタ (Millipore) で既知量ろ過し, 75°C で 1 時間乾燥させた。これをフィルタごとテフロン製分解容器に入れて PP の測定を行った。沈降付着物, 落ちカキ, 微小沈降物は, それぞれ単位時間, 単位筏あたりの負荷量を算出した。

カキの成長・海底負荷モデル 本研究で構築するモデルの概念図を Fig. 2 に示した。カキ筏数の経時変化を次式で表した。

$$\frac{dRFT}{dt} = Hng - Hvt + Mig \quad (1)$$

ここで, RFT は江田島湾内におけるカキ筏総数 (raft eta^{-1}) であり, ヨクセイ, イキス, ノコシのいずれかである。 Hng は新規に垂下する筏数 (raft d^{-1}), Hvt は収穫する筏数 (raft d^{-1}), Mig は江田島湾内外を移動する筏数 (raft d^{-1}) であり, それぞれ, カキ筏現存量調査より推定された値を用いた。また, ひとつのカキ筏を 1 つのボックスとみなし, この中にカキ個体数, 個体重量, 生殖腺重量および植物プランクトンをコンパートメントとしたモデルを構築した。また, それぞれの経時変化を次式で表した。

$$\frac{dOyN}{dt} = -(SpM + NtM) OyN \quad (2)$$

$$\frac{dOys}{dt} = asm - rsp - spw - migb \quad (3)$$

$$\frac{dOysg}{dt} = bp(asm - rsp) - spw - migg \quad (4)$$

Fig. 2 Schematic drawing of the model developed in the present study.

$$\begin{aligned} \frac{dPin}{dt} = & 2.0 \frac{difA_x}{d_y} (Pout - Pin) \\ & + 2.0 \frac{difA_y}{d_x} (Pout - Pin) + \frac{difA_z}{d_z} (Pout - Pin) \\ & - FR \times Pin \times OyN \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, OyN はカキの個体数 (ind. raft^{-1}), Oys はカキの個体軟体部重量 ($\text{g wet weight ind.}^{-1}$), $Oysg$ はカキの生殖腺重量 ($\text{g wet weight ind.}^{-1}$), Pin はカキ筏内植物プランクトン密度 (g P m^{-3}) であり, 植物プランクトンはリン量として表した。また, SpM は産卵によるカキの死亡速度 (d^{-1}), NtM はカキの自然死亡速度 (d^{-1}), asm はカキの同化速度 ($\text{g P ind}^{-1} \text{d}^{-1}$), rsp はカキの呼吸速度 ($\text{g P ind}^{-1} \text{d}^{-1}$), spw はカキの産卵速度 ($\text{g P ind}^{-1} \text{d}^{-1}$), bp は成長のうち生殖腺の成長に回す割合である。また, $migb$ および $migg$ は筏の移動による個体重量および 1 個体あたりの生殖腺重量の変化 ($\text{g P ind}^{-1} \text{d}^{-1}$) であり, これらは, 江田島湾内と湾外でのカキの個体重量は異なるので, 江田島湾外から湾内へカキ筏が持ち込まれる場合, 江田島湾内のカキと移入されるカキとの加重平均をする必要があるため設定した。移入は, イキスおよびノコシで 4, 5 月に起こるとし, 湾外のカキは宮島沿岸で得られた値を用いた。 A_x, A_y はカキ筏長辺および短辺の水平断面積 (m^2), A_z はカキ筏の面積 (m^2), d_x, d_y はカキ筏長辺および短辺での筏外との距離 (m), d_z はカキ筏底面での筏外との距離 (m), dif は筏内外の拡散係数 ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$) である。また, $Pout$ は筏外のリン量で表した植物プランクトン密度 (g P m^{-3}) であり, 2007 年 6 月～2009 年 2 月の浅海定線調査データのうち湾のほぼ中央にあたる Stn. 34 で得られたクロロフィル量から換算した月別平均値を線形補間して入力した。また, FR はろ水速度 ($\text{m}^3 \text{ind}^{-1} \text{d}^{-1}$) である。

産卵によるカキの死亡速度 (SpM) は, 平田ら⁸⁾に従い水温 $T(^{\circ}\text{C})$ とカキ個体重量に依存した次式で表した。

$$\begin{cases} \text{産卵日以外} & SpM = 0 \\ \text{産卵日} & Oys < 10 \quad SpM = 0 \\ \text{産卵日} & Oys \geq 10 \quad SpM = 10^{-3.9} \times Oys \times (T - 10)^2 \end{cases} \quad (6)$$

ただし, 産卵日とは, 次式が成り立つ日 (cd) を指す。

$$\sum_{i=1}^{cd} (Ti - 10) = 600 \text{ or } 900 \text{ or } 1200 \text{ or } 1500 \quad (7)$$

ここで Ti は最低水温の日以降 i 日目の水温である。カキの自然死亡速度 (NtM) は, 水温の関数として次式で表した。

$$NtM = M_{0\text{ oys}} \times \exp(k \cdot T) \quad (8)$$

ここで, $M_{0\text{ oys}}$ はカキの 0°C における死亡速度 (d^{-1}) である。カキの同化速度 (asm) は, 次式で表される。

$$asm = ar \times FR \times Pin \times oyWP \quad (9)$$

ここで, $oyWP$ はカキの湿重量/リン比 (g wet weight g P^{-1}), ar は同化率であり, 赤繁・高山⁹⁾に従い次式で表した。

$$ar = 0.773 \frac{18}{18 + prChP \times Pin} \quad (10)$$

ここで $prChP$ は植物プランクトンのリンとクロロフィル換算係数 (g Chl. g P^{-1}) である。ろ過速度 (FR), 呼吸速度 (rsp) は赤繁ら¹⁰⁾により次式で表した。

$$FR = (0.70 \times T - 6.6) \times oyDW \times Oys \quad (11)$$

$$rsp = 0.001 \times 24 \times \frac{12}{32} \times oyWC \times (0.072 \times T - 0.642) \times (oyDW \times Oys)^{0.75} \quad (12)$$

ここで, $oyDW$ はカキの乾重量/湿重量比, $oyWC$ はカキの湿重量/炭素重量比である。カキの産卵速度 (spw) は, 1 回の産卵によって生殖腺重量の半分が放卵するものと仮定して次式で表した。

$$\begin{cases} \text{産卵日以外} & spw = 0 \\ \text{産卵日} & spw = 0.5 \times Oysg \end{cases} \quad (13)$$

成長のうち生殖腺の成長に回す割合 (bp) は, 赤繁・高山⁹⁾に従い次式で表した。

$$\begin{cases} 0 < T \leq 10 & bp = 0 \\ 10 < T \leq 20 \text{ (Mar.} \sim \text{Spt.)} & bp = 0.95 \times (T - 10) / 10 \\ 10 < T \leq 20 \text{ (Oct.} \sim \text{Feb.)} & bp = 0.05 \times (T - 10) / 10 \\ 20 < T & \text{ (Mar.} \sim \text{Spt.)} \quad bp = 0.95 \\ 20 < T & \text{ (Oct.} \sim \text{Feb.)} \quad bp = 0.05 \end{cases} \quad (14)$$

また, カキ筏から海底への負荷速度はリン量で表し, 次式で表した。

$$\begin{aligned} Lraf = & RFT_{yoku} (fn_{yoku} + fo_{yoku} + ff_{yoku}) \\ & + RFT_{noko} (fn_{noko} + fo_{noko} + ff_{noko}) \\ & + RFT_{iki1} (fn_{iki1} + fo_{iki1} + ff_{iki1}) \\ & + RFT_{iki2} (fn_{iki2} + fo_{iki2} + ff_{iki2}) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで, $Lraf$ はリン量で表したカキ筏から海底への負荷速度 (g $P \text{ eta}^{-1} \text{ d}^{-1}$; ただし単位中の eta^{-1} は江田島湾全体あたりであることを示す。) であり, RFT の添え字 $yoku$, $noko$, $iki1$, $iki2$ はそれぞれ, ヨクセイ筏, ノコシ筏, 1 年目イキス筏, 2 年目イキス筏を示している。また, 同じように添え字のある fn , fo , ff は, それぞれ筏あたりの排糞量 (g $P \text{ raft}^{-1} \text{ d}^{-1}$), 落ちカキ量 (g $P \text{ raft}^{-1} \text{ d}^{-1}$), 落下したカキ付着物量 (g $P \text{ raft}^{-1} \text{ d}^{-1}$) である。 fn はヨクセイ, イキス, ノコシいずれも次式によって求めた。

$$fn = \left(FR \times Pin - \frac{asm}{oyWP} \right) \times OyN \quad (16)$$

また, 落ちカキ量 (fo), 落下したカキ付着物量 (ff) は, 上述の複数年にわたるカキ筏からの沈降物調査によって得られた落ちカキ量, 沈降付着物量に相当すると仮

Fig. 3 Loads of (a) organic matter originated from oyster shell surface and (b) fallen oysters.

定し, これを1年分のデータとしてまとめ, 最小二乗法による3次式への回帰によって次式を得た (Fig. 3)。

$$fo_{yoku} = -1.16717 \times 10^{-8} \times Jd^3 + 5.71816 \times 10^{-6} \times Jd^2 - 1.06915 \times 10^{-4} \times Jd + 0.01052 \quad (17)$$

$$fo_{noko} = 1.26446 \times 10^{-6} \times Jd^3 - 9.97772 \times 10^{-4} \times Jd^2 + 0.22119 \times Jd - 9.51063 \quad (18)$$

$$fo_{iki} = 1.44086 \times 10^{-7} \times Jd^3 - 1.12847 \times 10^{-4} \times Jd^2 + 0.02413 \times Jd - 0.6968 \quad (19)$$

$$ff_{yoku} = 1.30908 \times 10^{-7} \times Jd^3 - 8.56593 \times 10^{-4} \times Jd^2 + 0.01627 \times Jd - 0.73338 \quad (20)$$

$$ff_{noko} = 9.63958 \times 10^{-7} \times Jd^3 - 6.63491 \times 10^{-4} \times Jd^2 + 0.13089 \times Jd - 5.33712 \quad (21)$$

$$ff_{iki} = 1.89555 \times 10^{-7} \times Jd^3 - 1.37502 \times 10^{-4} \times Jd^2 + 0.02917 \times Jd - 1.38311 \quad (22)$$

ここで, Jd はユリウス日数である。ただし, それぞれ負の値をとる場合にはゼロとした。また, モデルによって得られる, 排糞量 (fn) は, カキ筏からの沈降物調査によって得られる, 微小沈降物に相当すると仮定し比較した。また, 複数年の観測によって得られたカキの個体重量, 個体数, 排糞量は1年分のデータとしてまとめ, モデル精度の検証に用いた。

計算は, ヨクセイ～ノコシおよびイキスの2つについてそれぞれ筏ごとに2年間行い, これに, 観測から

Table 1 Parameters for the model

Symbol	Definition	Value	Unit
dx	Horizontal length of the long sides of an oyster raft	20	m
dy	Horizontal length of the short sides of an oyster raft	10	m
dz	Vertical length of an oyster raft	10	m
Ax	Horizontal boundary area of the long sides of an oyster raft	200	m ²
Ay	Horizontal boundary area of the short sides of an oyster raft	100	m ²
Az	Vertical boundary area of an oyster raft	100	m ²
dif	Diffusion coefficient	100	cm ² sec ⁻¹
M_{oys}	Mortality rate of oyster at 0°C	0.0005	d ⁻¹
k	Coefficient of temperature effect	0.0693	—
$prChP$	Stoichiometric ratio of chlorophyll and phosphorus of phytoplankton	0.78	g Chl. g P ⁻¹
$oyDW$	Ratio of dry weight and wet weight of oyster	0.2	g DW g WW ⁻¹
$oyWC$	Ratio of wet weight and carbon of oyster	4.5	g g C ⁻¹
$oyWP$	Ratio of wet weight and phosphorus of oyster	500	g WW g P ⁻¹

推定された筏数を乗じて江田島湾全体の値を推定した。ヨクセイ〜ノコシをまとめて示したのは、ノコシが、ヨクセイのうち収穫を遅らせて10月頃から収穫する実施形態であり、ノコシはヨクセイという実施形態を必ず経るためである。そのため、ヨクセイ〜ノコシの計算結果のうち、初年の1月から次年の3月までの15ヶ月はヨクセイ、その後の4月から10月までの7ヶ月をノコシの結果を示す。タイムステップは0.001 d (86.4 sec) とし、計算に必要なパラメータについては Table 1 に示した。

感度解析 筏外の植物プランクトン密度が現状の−40, −20, +20, +20%の時の生産量, 負荷量, 負荷量/生産量について評価した。

結 果

江田島湾の筏台数 観測から見積もられた江田島湾の筏数は、総計では7月の1,760台が最大で、夏季に高密度であった (Fig. 4)。また、養殖形態ごとの延べ筏台数を365日で除した、日間平均台数はヨクセイ540台、イクス350台、ノコシ147台であり、ヨクセイが最も多かった。

モデルの再現性 いずれの養殖形態においても、秋から冬に排糞量においてやや過小評価であった以外、個体重量, 個体数ともに実測値をほぼ再現した (Figs. 5, 6)。

負荷量と生産量 筏あたりの負荷量は、ヨクセイ, ノコシ, イクスいずれも6〜7月に最も大きく、その内訳としては排糞によるものが主であった (Fig. 7A, B)。ただし、ノコシについては、落ちカキ量, 落下した付着物量の割合も多く、4月が最大でそれぞれ36%, 19%であった。

江田島湾全体に対する1〜12月の負荷量の変化を Fig. 7C に示す。5月から急増し、6月に最大で49.5 kg

Fig. 4 Seasonal variations of estimated oyster culture raft number for (a) the practice periods of Yokusei to Nokoshi, and of (b) Ikisu conducted in Etajima Bay. (c) Seasonal variation of oyster culture raft number composed of each culture method. The filled and open circles in (a) and (b) are observed and estimated data, respectively.

Fig. 5 Seasonal variations of (a) individual oyster weight, (b) number of oysters in an oyster raft and (c) egestion rate of oysters cultured by Yokusei and Nokoshi methods. Observed values (filled circles) and calculated values (lines).

Fig. 6 Seasonal variations of (a) individual oyster weight, (b) number of oysters per oyster raft, and (c) egestion rate of oyster cultured by Ikisu method. Observed values (filled circles) and calculated values (solid line).

Fig. 7 Estimated seasonal variations of organic matter load from the raft culture system, in which the organic matter is composed of detached organisms and detritus on oyster shells, living oysters, and feces egested by oysters. Estimation was carried out for (a) Yokusei and Nokoshi Methods, and (b) Ikisu method. (c) Seasonal variation of the total organic matter load from the raft culture system was estimated for all culture methods conducted in Etajima Bay.

$P \text{ eta.}^{-1} d^{-1}$ となった。そして7月に急減した後、8～10月に約 $15 \sim 20 \text{ kg P eta.}^{-1} d^{-1}$ で緩やかに減少した。その後再び減少して11月中旬以降は $5 \text{ kg P eta.}^{-1} d^{-1}$ 以下で翌年4月まで推移し、年間平均では $13.5 \text{ kg P eta.}^{-1} d^{-1}$ であった (Fig. 7C)。また、養殖期間中の江田島湾あたりの総負荷量を365日で割った日間平均負荷量 (ヨクセイおよびイクスについては1年目、2年目の和) は、ヨクセイ、ノコシ、イクスでそれぞれ、5.8, 4.1, $3.6 \text{ kg P eta.}^{-1} d^{-1}$ であり、筏台数の最も多いヨクセイで最も大きかった。一方、養殖期間中の筏あたりの総負荷量を養殖日数で割った日間平均負荷量は、ヨクセイ、ノコシ、イクスでそれぞれ、9.1, 13.2, $11.5 \text{ kg raft}^{-1} d^{-1}$ であり、ノコシが最も大きかった。

養殖期間中 (ヨクセイ、イクスは15ヶ月、ノコシは21ヶ月) の筏あたりの総負荷量、収穫時の水揚げ量 (生産量) およびそれらの比について Table 2 にまとめた。負荷量はノコシ、イクス、ヨクセイの順に大きく、生産量はノコシ、ヨクセイ、イクスの順に大きかった。その結果、負荷量/生産量比はノコシが最も大きく、イ

Table 2 Comparison of estimated organic load from oyster raft, production of oyster and rate of load per production among culture methods

	Yokusei	Ikisu	Nokoshi
Load (kg P/raft)	4.1	5.2	8.7
Production (t WW/raft)	2.2	1.9	2.9
Load/Production (kg P/t WW)	1.91	2.71	2.94

Fig. 8 Results of sensitivity analysis for (a) production and (b) load depending on phytoplankton biomass. (c) Load/production ratio depending on phytoplankton biomass.

キス, ヨクセイの順であった。

感度解析 植物プランクトンの増加に伴い, 負荷量,

生産量が増加した。これに伴い, 負荷量/生産量比は, ヨクセイでは低下, ノコシでは増加, イキスではほとんど変化が無かった (Fig. 8)。

考 察

広島湾については, カキ養殖を含めた浮遊生態系の物質循環に関する研究がいくつかなされており,¹¹⁻¹³⁾ 湾への流入負荷の10%¹¹⁾, 13%¹²⁾が食用牡蠣として湾から除去されることが示されているため, 広島湾においてカキ養殖が及ぼす物質循環への影響が大きいことが示唆される。また, 江田島湾でも, 物質循環および負酸素水塊形成への影響が大きいことが示されており,⁷⁾ 水産生物にとって健全な海洋環境を保つ上でカキ養殖の適正化は避けられない。

本研究では, カキ養殖の適正化のために必要な有機物負荷についての情報を得ることができた。この中で, 江田島湾では, カキ養殖から13.5 kg P eta.⁻¹ d⁻¹の負荷があり, その内訳ではヨクセイが43%と最も大きかった一方, 筏あたりの負荷量で比較すると, ヨクセイよりもノコシが1.5倍大きいことが明らかとなった。つまり, カキ養殖の規模を筏台数という量的評価だけではなく, 養殖実施形態という質的評価が重要であることが示された。これまでのカキ養殖と物質循環に関する研究では,^{7,11-13)} カキ養殖を単純化して捉えているため, 養殖形態の違いによる物質循環への寄与の差については議論がなされてこなかったが, 本研究では, カキの生理をモデル化し, 筏ごとの計算を行い, 筏の移動や養殖時期の設定を与えることで, 養殖形態別の生産や負荷の特徴を比較することができた。また, これまでは, カキ養殖からの負荷として糞や擬糞のみを評価していたが, 本研究では, 落ちカキや沈降付着物を調査した。これによって, 負荷全体に占める落ちカキや沈降付着物負荷の割合がヨクセイ, イキスでは0~3%であるのに対し, ノコシでは13%であることが明らかとなり, 負荷特性の違いをより詳しく明らかにすることができた。

ノコシは収穫時の個体重量が大きいばかりではなく, 生産量も大きかった (Figs. 5, 6, Table 2)。そのため, ノコシは収益性に優れていると言える。しかしながら, 本研究で明らかとなったように, ノコシは, 筏あたりの負荷量が最も大きく, 負荷量/生産量比は最も大きい (Table 2)。そのため, ノコシは最も海底の有機物汚染を引き起こしやすい養殖形態であると結論できる。一方, ヨクセイは負荷量が最も小さいため, 最も有機物汚染を引き起こしにくい養殖形態であると評価されると共に, 負荷量/生産量比では環境に対する負荷が小さく, 生産性の高い養殖形態であると評価される。江田島湾では, カキ養殖が負酸素水塊形成に及ぼす影響が大きいこ

とが示されている。⁷⁾ そのため、底質環境の改善という視点からは、カキ養殖場からの負荷量の削減が望ましい。その手法としては、本研究で明らかとなったように、各養殖形態の負荷特性を踏まえ、ノコシ筏の選択的削減、あるいはノコシからヨクセイまたはイクスへの移行が効果的であると考えられる。

本研究では、カキ養殖の適正化にむけて、カキ筏からの負荷特性についての知見を得ることができた。また、ここで構築したモデルは江田島湾のみならず、他の海域における負荷量の見積もりにも利用できる。ただし、海域によって溶存酸素の供給や海底が有機物を処理する能力が異なるため、カキ養殖の適正化に向けた負荷量の削減目標値も海域によって異なることが想定される。また、植物プランクトンによる一次生産など海域の物質循環とカキ養殖は相互に関係しており、しかもそれらは非線形的である。そのため、カキの養殖量、養殖実施形態を変えてシミュレーションした場合、対象海域の物質循環の応答も含めた目標達成状況の議論が必要となる。これらの点について、今後、本研究で構築したモデルを生態系モデルに組み込んで解析する必要がある。本研究では、限定的ではあるが、カキ養殖規模の削減に対する各養殖形態の負荷特性の応答を検討すること目的として、海域の植物プランクトン密度に対するモデルの感度を調査した。一般的に、カキ養殖の規模が減少すれば、海域の植物プランクトン密度が上昇することが想像される。その際、ヨクセイでは負荷量/生産量比が低下した一方、ノコシでは上昇した (Fig. 8)。このため、養殖規模の削減を想定した場合の環境の応答を考慮しても、海底への有機物負荷量の削減においてノコシからヨクセイへの積極的移行が有効であると考えられた。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、調査、分析に協力いただいた広島県立総合技術研究所水産海洋技術センター 高辻英之副主任研究員、ならびに同研究所西部工業技術センター 塚村慶子研究員、同研究所保健環境センター 伊

達悦二総括研究員、山本哲也主任研究員、小田新一郎副主任研究員、広島県水産課 田村義信普及専門員に心から厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) Hirata Y, Akashige S. The present situation and problems of oyster culture in Hiroshima Bay. *Bull. Fish. Res. Agen. Supplement*. 2004; **1**: 5-12.
- 2) 広島県水産試験場, かき養殖体系再構築技術開発事業—平成 10~12 年度のとりまとめ報告書—。平成 10~12 年度海面養殖業高度化推進対策事業 2001.
- 3) 楠木 豊. カキ養殖漁場における漁場老化に関する基礎的研究. 広島水試研報 1981; **11**: 1-93.
- 4) Grant J, Hatcher A, Scott DB, Pocklington P, Shafer CT, Winters GV. A multidisciplinary approach to evaluating impacts of shellish aquaculture on benthic communities. *Estuaries* 1995; **18**: 124-144.
- 5) Putth S, Matsuda O, Rajendran N, Yamamoto T, Maeda H. Uptake and release of particulate materials by suspended oyster culture in Hiroshima Bay. *J. Fac. Appl. Biol. Sci. Hiroshima. Univ.* 1997; **36**: 147-159.
- 6) Mariojous C, 楠木 豊, カキ筏直下の新生堆積物に関する研究. 広水試研報 1992; **17**: 21-36.
- 7) 陸田秀実, 黒川剛幸, 土井康明, 山本民次, 橋本俊也. 江田島湾における流動・物質収支モデルの構築と広島牡蠣養殖の影響. 海岸工学論文集 2008; **55**: 1201-1205.
- 8) 平田 靖. 広島湾における 2004, 2005, 2006 年夏季の養殖マガキのへい死. 広島総研水海技研報 2011; **4**: 印刷中.
- 9) 赤繁 悟, 高山恵介. 広島かき生産改善技術開発事業(2) 室内生育実験. 広島県水産試験場事業報告 2004: 32-34.
- 10) 赤繁 悟, 平田 靖, 高山恵介, 空本季里恵, 養殖マガキの酸素消費量および濾過水量の季節変化. 日水誌 2005; **71**: 762-767.
- 11) Putth S, Matsuda O, Yamamoto T, Rajendran N. The role of suspended oyster on nitrogen cycle in Hiroshima Bay. *J. Oceanogr.* 2000; **56**: 223-231.
- 12) Kittiwanih J, Yamamoto T, Hashimoto T, Tsuji K, Kawaguchi O. Phosphorus and Nitrogen Cyclings in the Pelagic System of Hiroshima Bay: Results of Numerical Model Simulation *J. Oceanogr.* 2006; **62**: 493-509.
- 13) 山本裕規, 山本民次, 高田忠宏, 三戸勇吾, 高橋俊之. 浮遊系-底生系カップリング・モデルによる広島湾北部海域の貧酸素水塊形成に関する動態解析. 水環境学会誌 2011; **34**: 19-28.