志津川湾におけるカキ養殖等の環境容量に関する数値モデル解析 ―震災前と現在の比較―

山本 裕規¹・吉木 健吾¹・小松 輝久²・佐々 修司³・
濱名 正泰⁴・村田 裕樹⁵・柳 哲雄⁶

¹正会員 復建調査設計株式会社 環境部 (〒732-0052 広島県広島市東区光町2-10-11)

E-mail:h-yamamoto@fukken.co.jp

²横浜商科大学教授 商学部商学科 (〒230-8577 神奈川県横浜市鶴見区東寺尾4-11-1)

³横浜商科大学研究員 地域経済研究所 (〒230-8577 神奈川県横浜市鶴見区東寺尾4-11-1)

⁴株式会社竹中土木 管理本部人事部 (〒136-8570 東京都江東区新砂1-1-1)

⁵横浜役所 (〒231-0017 神奈川県横浜市中区港町1-1)

⁶九州大学名誉教授, 国際エメックスセンター特別研究員 (〒651-0073 神戸市中央区脇浜海岸通1-5-2)

宮城県北東部の志津川湾はカキ, ワカメ, ホタテガイ, ホヤ, ギンザケの養殖が盛んな海域であるが, 東日本大震災の津波により養殖施設がほぼ全損し現在も復旧途上にある。本研究は, 志津川湾で行われているこれらの養殖を考慮した数値モデルを構築し, 震災前と現在の養殖形態の変化が, 志津川湾で最も水揚げ量の多いカキの成長や水揚げ量, 水質へ及ぼす影響等について解析を行った。その結果, カキ養殖筏の台数を震災前の1/3に削減したことでカキの身入りや成長を速め, 筏1台当たりの水揚げ高が増加すること, 海底へ沈降するカキ糞が減少することで海底付近での酸素消費が抑制され, 底層DOが1mg/l以上改善することを実証した。また, ホタテガイ, ホヤについてはカキと餌が競合するため, カキ養殖筏を増やすことでその身入りが減少する可能性が示唆された。

Key Words : Shizugawa Bay, numerical ecosystem model, oyster culture, dissolved oxygen

1. はじめに

宮城県北東部に位置する志津川湾は, 太平洋に開口した幅約6.5km, 奥行き約8km, 海域面積約47km², 流域面積約125km²の半開放性内湾であり, カキ, ワカメ, ホタテガイ, ホヤ, ギンザケ等の養殖が盛んな海域であるが, 2011年の東日本大震災の津波により養殖施設がほぼ全損した。現在も復旧途上であるものの, 養殖の状況を震災前の状態に戻すのではなく, カキについては養殖筏の台数を震災前の約1/3に削減, ギンザケについては, 生け簀の間隔を広げると同時に生産尾数を減らすなどの改善に取り組んでいる。その結果, 2016年3月には, 宮城県漁業協同組合志津川支所戸倉出張所が管轄するカキ養殖が, 環境に大きな負担をかけず, 地域社会に配慮した養殖業を認証する国際的な制度であるASC(水産養殖管理協議会)認証を, 我が国の養殖業として初めて取得した。

このように, 志津川湾では, それぞれの養殖に対して, 品質や生産効率が良く, 環境にもやさしい持続可能な養殖方法の確立が望まれているところである。

本研究では, 志津川湾で行われている様々な養殖物の成長等を考慮した数値モデルを構築し, 志津川湾で最も

水揚げ量が多いカキに着目して, 震災前と現在の養殖形態の変化がカキの成長や水揚げ高, カキ以外の養殖や水質へ及ぼす影響について解析を行った。

2. 数値モデルの概要

(1) 流動モデルと生態系モデル

本研究で構築したモデルは, 流れ場及び水温・塩分を計算する流動モデルと, 海水―底泥間の物質循環過程を考慮した生態系モデルの2つで構成される。流動モデルは鉛直多層レベルモデル¹⁾を適用し, 計算メッシュは志津川湾を水平方向に150m×150m間隔, 鉛直方向は海面から海底までを最大11層に分割した(図-1)。生態系モデルは, 中田ら²⁾が構築した浮遊生態系モデルをベースとして, Sohma et al.³⁾を参考とした底生生態系モデルを組み込んだ。また, 志津川湾で行われている養殖の効果を考慮するため, 浮遊生態系モデルにカキ⁴⁾, ワカメ⁵⁾, ホタテガイ⁶⁾, ホヤ⁷⁾, ギンザケ⁸⁾の個体成長モデルを組み込んだ。ここで, 林ら⁹⁾は志津川湾においてカキ糞・擬糞の有機炭素含有率と酸素消費速度を測定し, カキが高齢化するほど同化率が低下して糞・擬糞中の炭素含有量

が増加し、酸素消費速度が上昇することを明らかにしている。すなわち、カキ養殖筏を削減し養殖期間を短縮することで、沈降・堆積する糞・擬糞の酸素消費量が減少し、貧酸素化が改善する可能性があることを示唆している。数値モデルでこの効果を考慮するため、上記の測定結果に基づき、カキ糞由来のPOCについては、カキの年齢の変化（4-27ヶ月）に伴って酸素消費速度を変化（約0.09-0.60 mgO/h/g-DW）させるように設定した。

浮遊生態系モデルは、溶存酸素（DO）、植物プランクトン（PHY）、動物プランクトン（ZOO）、懸濁態有機物（POC）、溶存態有機物（DOC）、溶存態無機窒素（DIN）、溶存態無機リン（DIP）、養殖物であるカキ（OYS）、ホタテガイ（SCA）、ワカメ（SW）、ホヤ（SQU）、ギンザケ（SAL）、底泥の嫌氣的分解と共役して生成される還元物質（ODU：Oxygen Demand Unit）のコンパートメントを設けた。底生生態系モデルについては、DO、POC、DOC、DIN、DIP、ODU、堆積物食/懸濁物食ベントス（DF/SF）をコンパートメントとし、酸化層と還元層の2層に区分した。これらのコンパートメント間の物質循環経路は図-2に示すとおりである。

モデルパラメータについては、筆者らの既往のモデル解析¹⁰⁾で設定した値をベースに、志津川湾の実測値があるものはそれを適用してチューニングを行った（表-1）。

(2) 計算条件の設定

a) 気象・海象・水質

計算期間は、2014年1月1日から2015年8月31日までを対象とした。気象条件は、日射量については仙台地方気象台の観測値、気温、風向、風速については志津川気象観測所の観測値を一樣に与えた。開境界では、志津川の潮汐調和定数（海上保安庁水路部）より60分潮を考慮した推算潮位を設定した。また、開境界の水温と塩分については、JAMSTECによる日本近海の海洋変動予測システムによる再解析データ（FRA-JCOPE2）を与えた。また、水質の開境界値は、北海道大学・東北大学・東京大学による志津川湾内の定期水質観測地点のうち、最も湾口に近いStn.11-13（図-1）の観測値を線形補間して与えた。水温・塩分及び水質・底質等の初期条件については、上記の定期水質観測地点の値を参考に設定した。

b) 河川流入

陸域からの流入水量については、志津川流域の各河川集水面積に、降水量から蒸発散量を差し引いた値を乗じた水量が流入するものと仮定した。流入負荷量については、北海道大学による定期水質観測（河川：NH₄-N、NO₃-N、PO₄-P）の結果に、前述の流量を乗じることで設定した。

図-1 計算メッシュ

図-2 生態系モデルの物質循環経路

表-1 志津川湾での実測値より設定した主なパラメータ

項目	パラメータ	単位	備考
沈降速度(POC)	11.78	g/m ² /d	海水中
C/P (POC)	34.90	—	海水中
C/N (POC)	6.78	—	海水中
C乾燥重量 (OYS)	0.50	—	海水中
乾燥重量/湿重量 (OYS)	0.19	—	海水中

c) 養殖に関する条件

志津川湾内に設置されているカキ、ワカメ、ホタテガイ、ホヤ、ギンザケ養殖筏については、衛星画像よりマッピングしたデータに基づき台数と設置場所を把握し、計算メッシュ上にそれぞれの養殖筏台数を配分した。

カキ養殖筏の構造（養殖物を垂下する水深、筏1台当たりの養殖個数等）と養殖の年間スケジュール（カキの

垂下開始及び水揚げ時期)については、宮城県漁業協同組合志津川支所への聞き取りにより把握した。志津川湾のカキ養殖は1本約100mの桁網を2つセットにして行われており、1本の桁網に約180本の垂下網を設置している。カキを付着させる原盤は、1本の垂下網に水面下2mの位置から深さ方向に約30個設置されている。これに基づき、数値モデルでは、1メッシュ当たりのカキの個数、カキが設置されている深さなどを設定した。なお、志津川湾では殻付きカキを春季に一旦水揚げした後、網籠に入れて再度海に投入したものを夏季に収穫することで通年での出荷を可能としており、数値モデルでは、春季におけるカキの再投入も考慮した。その他の養殖(ワカメ、ホタテガイ、ホヤ、ギンザケ)についても同様に、聞き取り結果に基づき養殖筏の構造、養殖個数、養殖スケジュール等を把握し、数値モデルに反映させた。

3. 流況及び水質の再現計算

図-3に、2015年5月16日における満潮時の流速ベクトル図(計算値)を示す。永澤ら¹¹⁾によると、志津川湾では、湾内が成層化する時期においては、上層(5m)から流出、中層(5-25m)から流入、下層(25m-)から流出する流れの3層構造が存在することが報告されており、計算ではその状況が良好に再現されている。

図-4に、一例としてStn.1(図-1)における水温、塩分、DO、DIP、DIN及びChl-aの観測値と計算値を示す。

本研究では、数値モデルによる再現精度を定量的に評価するため、評価指標として藤原¹²⁾による誤差評価関数を用いた。この指標は、河川流量を推定するタンクモデル解析のモデル定数を最適化するために適用されたものである。誤差評価関数には高水部(いわゆるピーク流量時)の誤差を重視するRMSE(Root Mean Square Error)と低水部の誤差を重視するRR(Root Mean Square of Relative

図-3 流速ベクトル図(2015年5月16日:計算値)

Error)があり、いずれの値も小さいほど推定精度は良好とするものである。藤原¹²⁾によると、RMSEは約0.85以下、RRは約0.4以下で良好な再現精度とされている。志津川湾内の観測値と計算値に基づくRMSEとRRの評価結果は表-2に示すとおりである。RMSEについては表層のクロロフィルaを除き良好な再現精度であり、RRについては、表層・底層のDIN、表層・底層のクロロフィルaを除き良好な再現精度であった。なお、養殖物の年間累計水揚げ量の計算値は、宮城県漁業協同組合志津川支所より入手した魚種別の年間累計水揚げ量の実測値とほぼ一致する結果となった。

図-4 観測値と計算値の比較(Stn.1)

表-2 誤差評価関数による再現精度の評価結果

項目	RMSE		RR	
	表層	底層	表層	底層
水温	0.12	0.16	0.10	0.23
塩分	0.03	0.02	0.03	0.02
DO	0.13	0.15	0.14	0.13
DIN	0.65	0.73	1.34	5.75
DIP	0.48	0.48	0.71	0.51
クロロフィルa	1.40	0.70	15.90	1.90

※2014.1-2015.8の全ての水質観測地点の値により評価

4. 震災前と現在の比較

(1) 計算条件

養殖形態の変化が、志津川湾で最も水揚げ量の多いカキの成長や水揚げ量、水質へ及ぼす影響について把握するため、震災前（2009年）と現在（2014年）の養殖筏の配置状況を再現した場合の比較計算を行った。なお、水温、塩分、水質の開境界及び初期条件、河川流入水量及び流入負荷量はそれぞれ2009,2014年の観測値を与えた。

現在のカキ、ワカメ、ホタテガイ、ホヤ、ギンザケ養殖筏台数は、それぞれ震災前の約32%, 47%, 31%, 71%, 54%に減少している。それらの分布を初期値として与えた（図-5）。

(2) カキ身肉重量、水揚げ量・水揚げ高

震災前後のカキ身肉重量の計算結果によると、震災前はカキの収穫までに2-3年の期間が必要であったのに対し、現在は1年弱で出荷可能サイズ（約8g）まで成長するようになったこと、震災前は湾奥部ほど身肉重量が小さかったが、現在は湾全体の身肉重量が増加したという聞き取り結果と一致しており（図-6、図-7）、今回の数値モデル解析によって筏台数の削減がカキの身入りや成長を速めたことを確認できた。震災前後の水揚げ高の変化を計算した結果は図-8に示すとおりである。カキの水揚げ高は、宮城県漁業協同組合志津川支所より共販台帳を入手し、殻付きカキ及び生ガキについてそれぞれむき身重量と単価の相関式を作成し、計算で得られた水揚げ量を乗ずることで算定した。これによると、震災前に比べ総水揚げ高は減少したが、筏1台当たりの水揚げ高は増加しており、生産効率が向上していることが示された。

(3) 底層DO

震災前後の底層DOの変化を計算した結果は図-9に示すとおりであり、震災前は湾奥部で夏季に4mg/l以下まで低下していたが、現在は年間を通して最大1mg/l以上改善している。

図-5 震災前後の養殖筏の配置（カキ養殖の例）

図-6 震災前後のカキ身肉重量計算結果（湾平均）

(1) 震災前（2009.10.1）

(2) 現在（2014.10.1）

図-7 震災前後のカキ身肉重量の平面分布

図-8 震災前後のカキ年間水揚げ高の計算結果

図-9 震災前後の底層DO計算結果の比較（Stn.1）

5. 考察

震災前に比べ現在のカキ生産効率が向上し、底層DOが改善している要因について解析するため、図-10に示すラインの内側（ほとんどのカキ養殖がこのエリア内で行われている）を対象に震災前後（2009年と2014年）のN,P,DO収支計算（年平均値）を行った（図-11）。ここで、図中の括弧内の数値が震災前（2009年）を示している。また、志津川湾の定期水質観測結果及び水温計算結果によると、湾奥部では夏季に水深6m付近で水温躍層が形成されていることが確認されたため、水深6mを境に上層、下層に分割して物質収支を算定した。

志津川湾では、震災前に比べカキの身入りが良好になっているが、図-11(1),(2)によると、カキ現存量に対する植物プランクトン摂餌量の割合が、Nで3.2% (130/4,024)から3.6% (30/833), Pで0.5% (4/783)から1.9% (3/162)と、震災前に比べて増加しており、震災後はカキの成長効率が向上していることが計算により明らかとなった。

また、震災前に比べカキ糞の発生量は上層、下層でそれぞれ77-80% (N), 67-83% (P)減少しており、その結果、図-11(3)に示すように、海底泥の酸素消費速度が約34%減少している。前述のとおり、志津川湾では、カキの養殖期間が短いほどカキ糞・擬糞の酸素消費量が減少することがわかっているが⁹⁾、計算でそのことが実証される結果となった。これらのことから、現在のカキ養殖筏の台数と1年弱という養殖期間は、カキ糞を速やかに分解し、海底付近の貧酸素化を引き起こさない、環境への負荷が少ない養殖形態であると考えられる。

ホタテガイ及びホヤ養殖は、カキと同様に植物プランクトンを摂餌するため、カキ養殖と餌の競合が発生することが推測されるが、図-11(1),(2)によれば、震災前に比べカキの現存量が大幅に減少したことで相対的にホタテガイ、ホヤによる植物プランクトン摂餌量が増え、特にホタテガイについては、養殖筏台数が震災前の約47%に減少しているにもかかわらず、現存量が増加することが計算により明らかとなった。

参考までに、現在の養殖筏のうち、カキ養殖筏台数のみを3倍に増やすと仮定した場合の、ホタテガイ、ホヤ

図-10 物質収支の計算範囲

の最大身肉重量の変化（湾平均）を図-12に示す。カキ養殖筏を現在の3倍に増やすと仮定した場合、ホタテガイ、ホヤともに身入りが減少する結果となり、仮にカキ養殖筏のみを増加させると、ホタテガイ、ホヤの水揚げ量が減少する可能性があることを示唆している。

ワカメについては、震災前に比べ養殖筏台数が約32%に減少しているにもかかわらず現存量が増加しており、筏台数を削減することで生産効率が向上するものと考えられる。なお、ワカメの現存量が増加しても、カキの餌となる植物プランクトンの現存量がほとんど変化しないのは、ワカメ養殖が12-5月頃に行われるのに対し、カキの成長は9-10月頃にピークとなることから、栄養塩を利用するカキの餌となる低次生産者とワカメとの競合が発生しないためと考えられる。

(1) N循環

(2) P循環

(3) DO循環

図-11 震災前後の物質収支の比較（年平均値）

図-12 カキ養殖筏を現在の3倍に増やすと仮定した場合のホタテガイ、ホヤの最大身肉重量計算結果（湾平均）

6. おわりに

震災前後の養殖形態の変化について数値モデルにより解析した結果、筏台数の削減がカキの身入りや成長速度を速めることや、底層DOを改善することが確認され、カキ養殖については、現在の養殖量は品質・生産効率ともに高く、環境への負荷も少ない、すなわち持続可能な養殖量であることを示した。今後は、本研究で構築した数値モデルをベースに、カキを含む全ての養殖形態を変化させた場合の最適養殖量の解析と、その実現のための土地利用デザインや沿岸域利用を提案できる、陸域-海域統合数値モデルを今年度開発する予定である。

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費S-13「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 中田喜三郎, 堀口文男, 田口浩一, 瀬戸口泰史: 追波湾の3次元潮流シミュレーション, 公害資源研究所彙報, 第12巻, pp.17-36, 1983.
- 2) 中田喜三郎, 堀口文男, 田口浩一, 瀬戸口泰史: 沿岸海域の3次元形態-流体力学モデル, 公害資源研究所

彙報, 第13巻, pp.119-134, 1983.

- 3) Sohma, A., Sekiguchi, Y., Kuwae, T. and Nakamura, Y.: A benthic-pelagic coupled ecosystem model to estimate the hypoxic estuary including tidal flat - Model description and validation of seasonal / daily dynamics, *Ecol. Model.* Vol.215, pp.10-39, 2008.
- 4) 川口修, 平田靖, 若野真, 山本民次, 陸田秀実: カキ養殖の実施形態別有機物負荷特性の評価, 日本水産学会誌第77巻, No.6, pp.1043-1050, 2011.
- 5) Kishi, M. J. and Uchiyama, M.: A three-dimensional numerical model for a mariculture nitrogen cycle: case study in Shizugawa Bay, Japan, *Fisheries Oceanography*, Vol.4, No.4, pp.303-316, 1995.
- 6) 中村義治, 奥出壮, 寺沢知彦: CO₂ 固定量評価に係わる貝類代謝モデルの開発-ホタテガイ-, 海岸工学論文集, 第52巻, No.2, pp.1066-1070, 2005.
- 7) Shin, Y. K., Je Jun, J.C., Kim, E.O. and Hur, Y. B.: Physiological Changes and Energy Budget of the Sea Squirt *Haliotis roretzi* from Tongyeong, South Coast of Korea, *Kor J Fish Aquat Sci.*, Vol.44, No.4, pp.366-371, 2011.
- 8) 野村 宗弘, 千葉 信男, 徐 開欽, 須藤 隆一: 内湾の水質に及ぼす水産養殖からの汚濁負荷の影響, 水環境学会誌, 第21巻, No.11, pp.719-726, 1998.
- 9) 林恭平, 池田朝泰・ジョンイジョウ・藤林恵・西村修・坂巻隆史: 志津川湾におけるカキの養殖期間の違いが糞による酸素消費に及ぼす影響, 平成26年度土木学会東北支部研究発表会, 2015.
- 10) 山本裕規, 山本民次, 高田宏忠, 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, 第34巻, No.2, pp.19-28, 2011.
- 11) 永澤 豪, 田中 仁, 松村勝之, 山路弘人: ADCPを用いた志津川湾内流動の観測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.396-400, 1998.
- 12) 藤原洋一: 進化型計算法による流出モデル定数の多目的最適化に関する研究, 神戸大学学位論文, 2004.

(2017.3.15 受付)

NUMERICAL EVALUATION OF ENVIRONMENTAL CAPACITY OF AQUACULTURE IN SHIZUGAWA BAY - Comparison before and after the Great East Japan Earthquake -

Hironori YAMAMOTO, Kengo YOSHIKI, Teruhisa KOMATSU, Syuji SASA,
Masahiro HAMANA, Hiroki MURATA and Tetsuo YANAGI

Shizugawa bay is a semi-closed sea located in the northeastern part of Miyagi prefecture where farming such as oysters, seaweeds, scallops, sea squirts and coho salmon, but almost all the rafts were damaged by the tsunami of the Great East Japan Earthquake. In the present study, we constructed a numerical model that considers these aquaculture conducted in Shizugawa bay, and analyzed the changes of oyster harvests and water quality when changing the number of aquaculture rafts before and after the earthquake disaster. As a result, by reducing the number of oyster cultivation rafts to 1/3 before the disaster, the growth of oysters is accelerated and value of landings per raft is increased, and the bottom layer DO increased by 1 mg/l or more. In addition, it was suggested that growth of scallops and sea squirts decreased by increasing oyster cultivation rafts.