

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

Development of an estuarine ecosystem model and evaluation of impact of oyster culture on the ecosystem of Etajima Bay

陸田秀実¹・黒川剛幸²・土井康明³・山本民次⁴・橋本俊也⁵

Hidemitsu MUTSUDA, Takayuki KUROKAWA, Yasuaki DOI, Tamiji YAMAMOTO and Toshiya HASHIMOTO

To understand transportation of phosphorus in Etajima Bay, northern part of Hiroshima Bay, and evaluate impacts of oyster culture on the ecosystem, we have developed a pelagic and benthic coupled coastal ecosystem model expressing phosphorus cycle in Etajima Bay. This model consists of three sub-models, i.e. coastal circulation model, pelagic ecosystem model and benthic ecosystem model, considering all the concerned physical and biological processes. We have investigated characteristics of coastal circulation and exchange rate of sea water in Etajima Bay and also have studied the effects of oyster culture on the formation of oxygen-depleted water and resulted breakdown on the benthic ecosystem.

1. はじめに

広島湾北部海域の閉鎖度指数は4.01であり、東京湾1.78や大阪湾3.20、伊勢湾1.52と比べてもかなり高いと言える（広島湾再生行動計画, 2007）。その湾奥部に位置する江田島湾は、1940年代後半から広島牡蠣（全国シェア約60%）の養殖場として有名な海域である。この海域は、主な流入河川がなく、瀬戸内海の潮流影響を直接受けることもないため非常に閉鎖性が高い。また、広島湾に係留されている牡蠣筏は、夏場の台風による高波被害を避けるため、この江田島湾を避難場所として使用しており、古くから広島牡蠣養殖の要所である。その一方で、湾内には大量の牡蠣筏が持ち込まれることから、底層には牡蠣の死骸や排泄物が大量に堆積している。さらに、湾内外水の交換が非常に悪いことから、有機汚泥が海底に長期間滞留し、堆積物分解による貧酸素状態が毎年頻発する。そのため、底泥中の硫化物濃度の上昇は底生生物の急激な減少を招き、ナマコ等はほとんど獲れなくなってしまった。

そこで、本研究では、広島牡蠣が存在する江田島湾内の環境再生・維持管理、里海保全に向けた方策を打ち出すこと、さらには、水産資源の持続的な生産を可能とする生息環境を明らかにすることを目的として、江田島湾における流動・物質収支モデルを構築し、その現地適用を行う。また、江田島湾の流動や物質収支の特性、広島

牡蠣養殖が江田島湾の水質・生態環境に与える影響について考究する。

2. 江田島湾の概要と現地観測

図-1に示すように、江田島湾は広島湾内に存在する江田島と能美島に囲まれた閉鎖性海域である。海底地形は椀型で平均水深は15m程度であり、水域面積は約12km²の海域である。

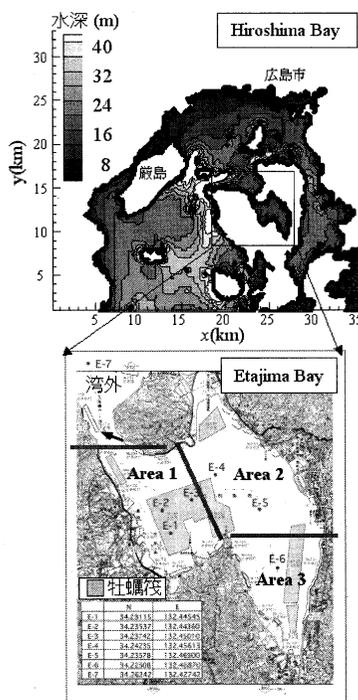


図-1 計算領域となる広島湾と江田島湾の水深 (下図内の矢印: 区画漁場No.159)

- 1 正会員 博(工) 広島大学大学院准教授工学研究科社会環境システム専攻
- 2 学生会員 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
- 3 正会員 工博 広島大学大学院教授工学研究科社会環境システム専攻
- 4 正会員 農博 広島大学大学院教授生物圏科学研究科環境循環系制御学専攻
- 5 理博 広島大学大学院准教授生物圏科学研究科環境循環系制御学専攻

その湾口部津久茂瀬戸(下図内の矢印:区画漁場 No. 159の端, 浮標灯小筏)において, 2007年夏季(7~8月)と冬季(1~2月)に観測を行った。観測項目は, メモリー式電磁潮流計 ACM16-M (ALEC 電子社製) 3台を用いて, 流向流速, 水温, 塩分であり, 設置水深5m, 10m, 15mで行った。

なお, 流向流速はバースト10分, 10サンプルの平均値, 水温塩分は1サンプルの平均値とした。なお, 図中に示す Area1~3は, それぞれ湾口部, 湾中央部, 湾奥部の分割した海域を示しており, 海水交換の推定(後述)の際に用いる。

3. 江田島湾海洋環境シミュレータ

(1) モデル概要

本研究で開発する江田島湾海洋環境シミュレータは, 流動モデル(陸田ら, 2004), 浮遊生態系モデル, 底生生態系モデルの3つのサブモデルで構成され, サブモデル間の物理量や物質収支のやり取りを考慮したものである。

流動モデルは σ 座標系を用いた準3次元モデルとし, 流速, 水温, 塩分を時間発展させ, 密度は水温と塩分より求めた。

浮遊生態系モデルと底生生態系モデルは, 満潮ら(2002), 橋本(2007), 山本(2007)に倣い, 図-2のようなコンパートメントを設定するとともに物質収支を構成し, それぞれの数値生態系モデルをカップリングした。すなわち, 浮遊生態系モデルでは, 植物プランクトン(P), 動物プランクトン(Z), 溶存態有機リン(DOP), デトリタス(DET), カキ(OYS), 溶存態無機リン(DIP), 溶存酸素(DO)の7つのコンパートメントとし, 生物・化学的変化項を考慮した移流拡散方程式を解くことによって, 各物質の時間発展を行った。

なお, 夏季を対象としているため, 植物プランクトンは鞭毛藻類とし日周鉛直移動を考慮することとした。溶存酸素濃度は, 上層では飽和状態とし, 下層域のみの変動について, 水中でのデトリタス・DOPの分解による消費, 海底でのデトリタスの分解による消費, 植物プランクトンの光合成によって, 算出することとした。

また, 底生生態系モデルでは, 懸濁物食ベントス(SFB), 堆積物食ベントス(DFB), 底生微細藻類(MFB), デトリタス(DET), 溶存態有機リン(DOP), 溶存態無機リン(DIP)の6つのコンパートメントとし, 移流拡散はさせずに, 生物化学的変化項のみを考慮した。なお, 各コンパートメントの時間変動や生物的变化項の定式化の詳細については山本ら(2007)を参照されたい。浮遊系と底生系モデルは, カキの死亡・排糞, DIPとDOPの溶出, デトリタスの沈降, 懸濁物食ベントスの摂餌によって結合を行っている。

カキ筏の設置場所は衛星画像データより特定し, そのメッシュでは, 土井ら(2001)のカキの抵抗力およびカキモデルを考慮した。広島カキは垂下式養殖技術が採用されていることを考慮して, 水深10mまでのメッシュについて同モデルを組み込むこととした。

本研究では, 一年を通じて最も有機物負荷が多く貧酸素状態となる夏季を対象として, 初期の流動条件および生物条件を設定し, 本シミュレータを稼動することにした。なお, 本研究ではデータ同化を行っていない。

(2) 計算条件の概要

本研究では, まず始めに広島湾全域(200mメッシュ, 183×139)において, 南境界の潮位を駆動力として潮流計算を行い, その結果に基づいて, 江田島湾口で潮流速と潮位のネスティング処理を行った。江田島湾の計算では, 100mメッシュ, 鉛直9層に分割した。時間刻みは外部モード0.5s, 内部モード2.5sとし, 貧酸素化の発生しやすい夏季1週間の時間積分を行った。なお, 水温および塩分濃度については, 現地観測結果に基づき初期条件を設定した。生物化学的変化項に関わるパラメータについては橋本(2007), 山本(2007)を参考にした。

4. 計算結果

(1) 精度検証

図-3は, 江田島湾口付近の水深5mにおける南北流速, 塩分濃度, 水温について, 現地観測結果(2007/07/26)と比較検証したものである。潮流速の卓越成分である南北流の時間変動, さらには水温・塩分の定常的な時間変動を精度良く計算できていることが分かる。なお, 水深15mにおける同物理量についても観測結果と良好な一致を示していたことを付記しておく。

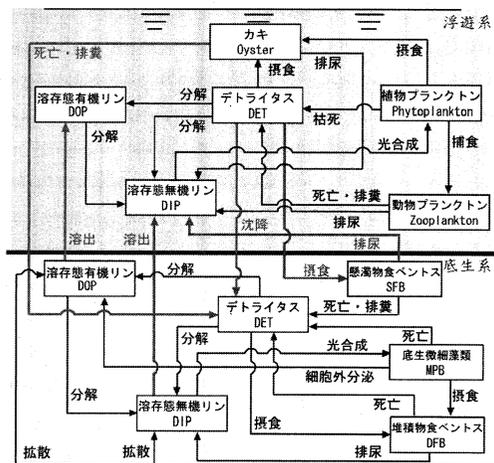


図-3 浮遊系・底生系数値モデルのコンパートメント

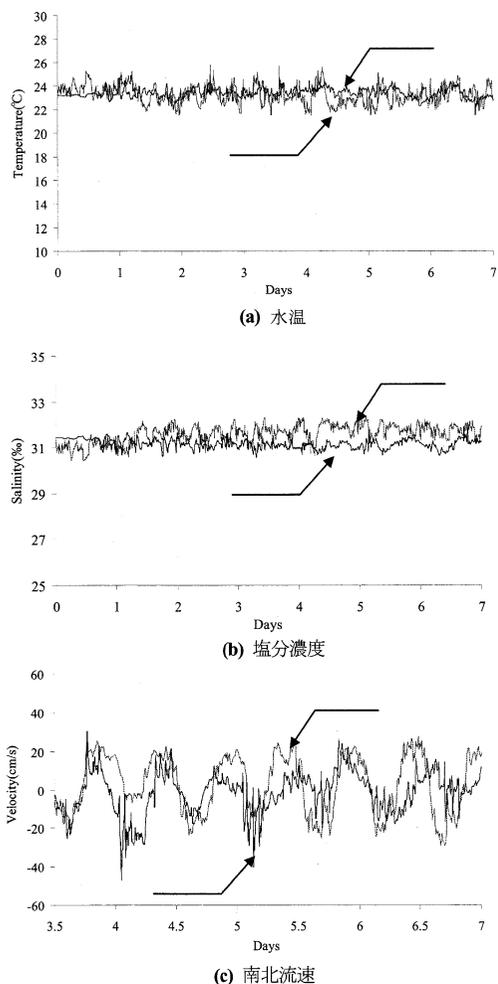


図-3 水深5mにおける本シミュレーション結果と現地観測との精度比較

(2) 江田島湾の海水交換特性

ここでは、江田島湾内外水の海水移動特性を調べるため、二相流体モデルに基づき、対象エリア内の海水の相体積率を計算し海水交換率を求める。ここで、相体積率とは、対象エリアの海水が各計算格子に占める割合を示す。この相体積率を移流計算することによって、各計算格子に占める対象エリア（図-1に示すArea1～3と湾外）の海水割合を非定常的に求めることが可能となる。

図-4は、湾外水（Outside water）、湾口部（Area1）、湾中央部（Area2）および湾奥部（Area 3）の各領域に対して、潮汐変動50周期目までの海水移動特性について調べた。Area2およびArea3の海水のほとんどは50周期後も江田島湾内に滞留し続けていることから、閉鎖性が強いことが分かる。また、Area1の海水も湾口および湾

奥への海水移動はそれほど大きくないことから、この領域に存在する牡蠣筏がより一層の閉鎖性を高めていると言える。

図-5は、牡蠣筏有り・無しの場合における海水交換率の水平分布を示す。ここでは、格子に占める湾内水の割合の鉛直平均を海水交換率と定義しており、100%の場合は初期の湾内水で全て満たされ、湾外水が全くない状態を意味する。牡蠣筏有の場合、牡蠣筏を配置した湾奥東側海域において海水交換が妨げられている。さらに、50周期後であっても、海水交換は湾奥東側海域では殆ど行われず、主に西側海域に限定されていることが分かる。

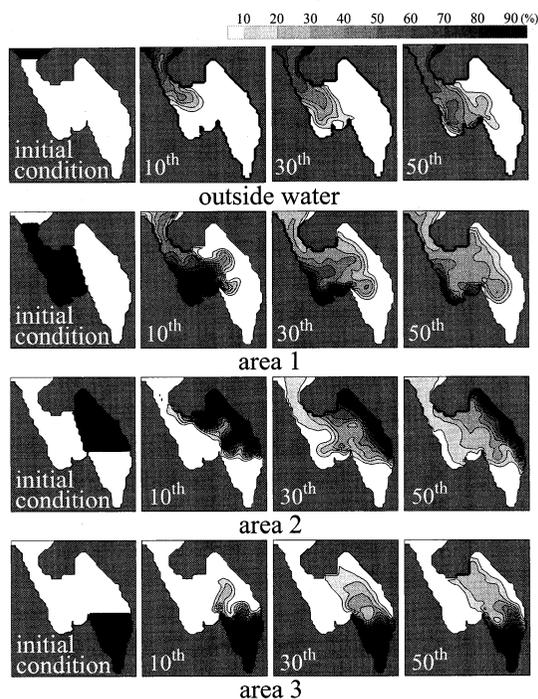


図-4 江田島湾内の領域別海水移動特性。上から順に、湾外水の流入（outside water）、湾口部（Area 1）、湾中央部（Area 2）、湾奥部（Area 3）の海水移動過程を示す。

50周期後拡大図

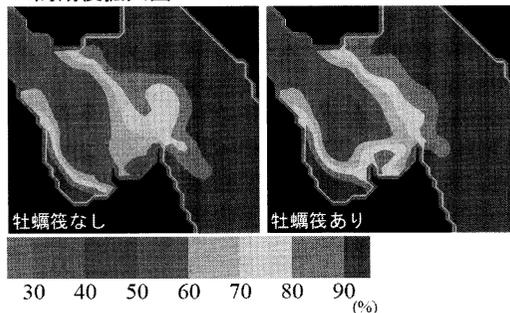


図-5 江田島湾に流入した湾外水の長期的変動に及ぼす牡蠣筏の影響（湾内水の占有率）

さらに、図-6は、湾全体の体積 (V_{in}) と流入した湾外水の体積 (V_{out}) 比による海水交換率の時系列を示したものである。図より、30日経過後の江田島湾の海水交換率は湾口部 Area1で約40%程度であり、Area2およびArea3ではわずか5%前後に過ぎないことが分かる。また、湾全体の海水交換日数を概算すると約300日程度と推定された。

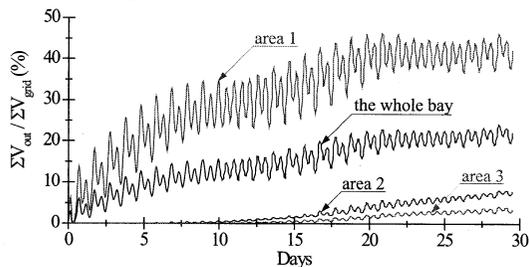


図-6 各領域に占める湾外水の時間変化

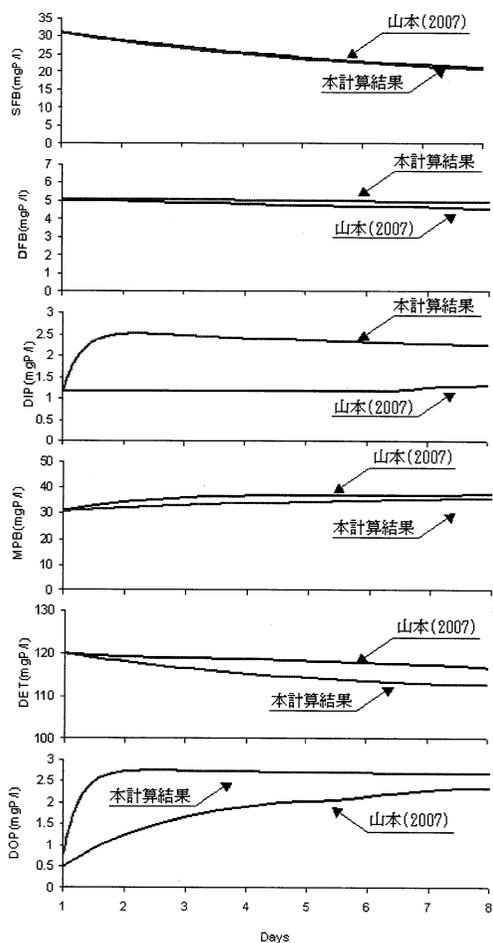


図-7 底生系コンパートメントの精度検証

(3) 浮遊・底生生態系の物質収支

次いで、上層・下層の物質収支に与えるカキ養殖の影響を調べるため、本数値計算結果に基づいて、底質環境が悪化する夏季の現況再現と物質循環過程を調べることにする。

まず始めに、図-7は、底生系モデルの各コンパートメントについて、パラメータのチューニングを行った後、山本 (2007) のモデル結果と比較検証したものである。DIP の値がやや過小評価であることを除けば、いずれのコンパートメントも最終的にはほぼ一致することが分かる。

図-8は、浮遊系コンパートメントの物質収支結果を示したものである。この図から、カキ養殖場内の底質に対する有機物負荷の約90%がカキの排泄物によるものであることが分かる。なお、この結果は橋本 (2007) の結果と良好な一致を示した。また、底生系の物質収支結果を図-9に示す。

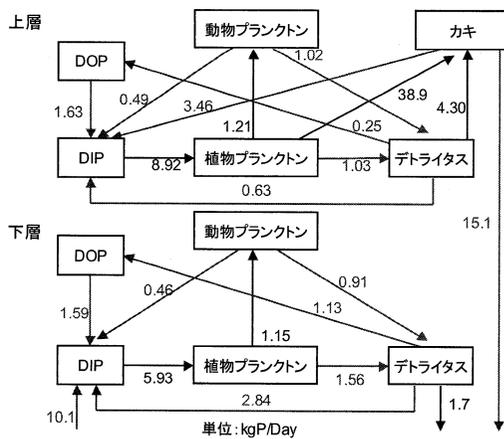


図-8 浮遊系上層・下層の物質収支に与えるカキ養殖の影響 (リン循環様式)

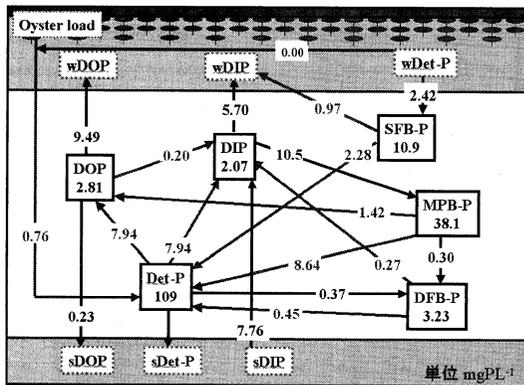


図-9 カキ筏設置場所における底生系の物質収支 (リン循環様式)

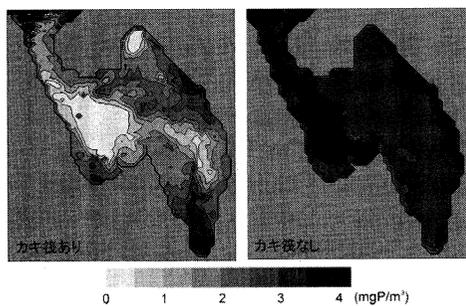


図-10 表層における植物プランクトンの空間分布

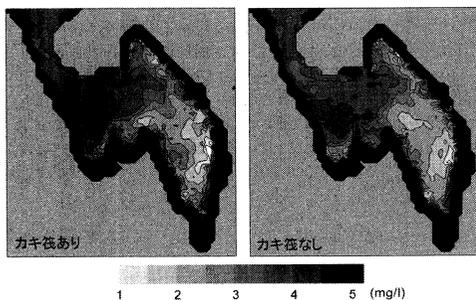


図-11 底層における溶存酸素濃度の空間分布

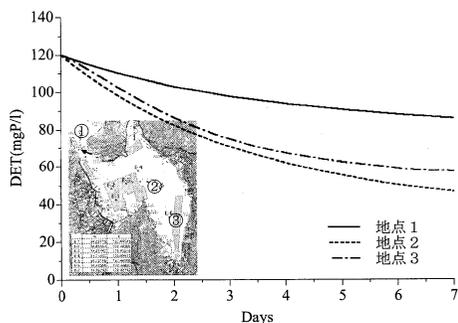


図-12 底層におけるデトリタスの時間的変化

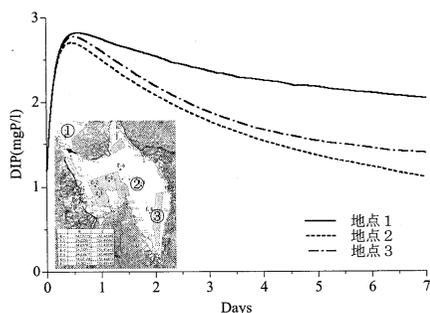


図-13 底層における溶存態無機リンの時間的変化

さらに、図-10および図-11は、それぞれ6日目～7日目の底層の溶存酸素濃度および表層の植物プランクトンの空間分布について、カキ筏の有無による影響比較を行ったものである。カキ筏ありの場合、表層の植物プランクトンは急激に消費され、湾全体に及んでいることが分か

る。また、底層の溶存酸素濃度は、カキ筏の有無に関わらず、湾奥部において貧酸素化が顕著である。さらに、カキ筏のある場所において貧酸素状態がより顕著となり、その貧酸素水塊は周辺海域にも広がっていくことが分かった。このような貧酸素水塊は、底質の悪化や物質循環に影響を及ぼしていると考えられる。そこで、図-12および図-13は、湾外（地点①）、湾中央（地点②）、湾奥（地点③）の底質におけるデトリタスと溶存態無機リンの時間的な変化を示す。湾中央や湾奥の貧酸素水塊が顕著となる領域において、デトリタス減少に伴う分解量の低下によってDIPも減少している。また、底生動物ベントスが減少し、底生微細藻の摂食量が減り、枯死量は増大傾向となり、一層の底質悪化につながることも分かった。

5. おわりに

本研究では、流動モデル、浮遊生態系モデルおよび底質生態系モデルの3つのサブモデルを組み込んだ江田島湾海洋環境シミュレータを開発し、以下の主要な結論を得た。

- (1) 江田島湾の海水交換率は非常に悪く、湾内の全海水が交換されるのに約300日程度と推定された。特に、湾口付近（Areal）の牡蠣筏群が一層の閉鎖性を高めていることが分かった。
- (2) 本シミュレータは、流動・物質収支に関して、現地観測および既往のモデル結果と良い一致を示すことが分かった。
- (3) カキ筏の有無による貧酸素水塊の時間空間的な変化が明らかとなった。この貧酸素水塊により底生ベントスが減少し、底生微細藻摂食量が減って、自然枯死量が増大したものと考えられる。その結果として、一層の底質悪化につながる。

今後は、浮遊・底生生態系モデルに関するパラメータ同定について、さらなる検討が課題となろう。

謝辞：本研究は、H19年度「広島大学地域貢献発展研究」の助成を受けた。広島県立総合技術研究所水産海洋技術センターの平田 靖氏には、現地観測およびデータの御提供を頂いた。さらに、本計算結果の一部は広島大学大学院工学研究科博士後期課程の新井 洋氏に御協力頂いた。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 土井康明・森下 圭 (2001)：養殖牡蠣筏がある閉鎖性海域の流況計算，西部造船論文集，第102巻，pp.57-62。
 橋本俊也 (2007)：江田島湾の環境再生を考えるシンポジウム講演要旨集，pp.21-24。
 広島湾再生行動計画 (2007)：広島湾再生推進会議，55p。
 満潮 太・柳 哲雄・橋本俊也 (2002)：広島湾のカキ養殖と海洋環境，九州大学総合理工学府報告，第24巻，pp.199-206。
 陸田秀実・市位嘉崇・土井康明・内堀博之 (2004)：広島湾の水質・生態系モデルとカキ養殖の影響，海岸工学論文集，第51巻，pp.1111-1115。
 山本民次 (2007)：江田島湾の環境再生を考えるシンポジウム講演要旨集，pp.25-28。