

世代追跡型ホタテガイ個体成長モデルを組み込んだ浮遊一底生系連結生態系モデルの開発

—サロマ湖の漁場環境及び養殖許容量評価に関する新たな試み—
MODELLING OF PELAGIC-BENTHIC INTEGRATED ECOSYSTEM COUPLED
WITH A GENERATION-TRACING TYPE SCALLOP GROWTH MODEL
- A NEW ATTEMPT TO EVALUATE FISHERY ENVIRONMENT AND CARRYING CAPACITY
IN SAROMA LAKE -

佐藤達明¹・今津雄吾²・佐川拓也²・風間隆宏³・小形孝⁴・岡貞行⁵
Tatsuaki SATO, Yugo IMAZU, Takuya SAKAWA, Takahiro KAZAMA,
Takashi OGATA and Sadayuki OKA

¹地環修 株式会社アルファ水工コンサルタンツ (〒063-0829 札幌市西区発寒9条14丁目516-336)

²工修 株式会社アルファ水工コンサルタンツ (同 上)

³理修 株式会社アルファ水工コンサルタンツ (同 上)

⁴社団法人北海道栽培漁業振興公社 (〒060-0003 札幌市中央区北3条西7丁目1番地)

⁵正会員 水産庁 漁港漁場整備部 (〒100-8907 東京都千代田区霞が関1-2-1)

A new numerical marine ecosystem model has been developed to find out the optimum management plan of cultured scallops. In this model, a pelagic ecosystem model describing primary production mechanism, a benthic ecosystem model describing organism mineralization processes in sediment, and physiological processes of scallops as a generation-tracing type model are integrated comprehensively. Those features make it possible to evaluate the weight change of cultured scallops and released nutrients from sediment depending on the sediment condition. Applying this model to Saroma Lake, Japan, has shown good accordance with observations. Therefore this model will be a useful tool to evaluate the effect of management of water environment or culturing quantitatively, and will contribute to sustainable fishery in enclosed bay.

Key Words : *Ecosystem modelling, scallop farming, sustainable fishery, and Saroma Lake*

1. はじめに

日本では、その独特の食文化から伝統的に動物性タンパク質摂取における水産物の依存率が高い。しかし、近年の水産資源の減少や国際的な漁業制限により、持続可能な水産物供給手法として養殖漁業が重要となってきた。養殖漁業は静穏な閉鎖性海域で行われることが多い。海水交換の悪い閉鎖性海域では、陸域負荷に加えて底質の水質への影響が顕著である。従って、これら閉鎖性海域における養殖生物の高密度飼育は、排糞の堆積により底質の悪化を促進し、底泥からの栄養塩溶出が増加し水質が悪化するという一連のプロセス、つまり漁場環境の劣化を促進する結果となる。

閉鎖性海域における養殖生物の水質・底質環境への影響評価は、以前より行われている¹⁾。特にその

水質浄化能が着目される二枚貝については、近年数値生態系モデルによるシミュレーションが発展しており^{2), 3)}、水域環境管理施策検討時の有力なツールとして期待されている。

北海道のサロマ湖では、ホタテガイの養殖が盛んであり、養殖に係る各種調査が精力的に実施されている^{4), 5)}。近年、湖内水質及び底質の悪化傾向が認められていることから、ホタテガイ養殖を今後とも持続可能とするための水域環境管理施策を検討できる数値モデルが早急に必要とされている。

本研究では、北海道のサロマ湖において平成14年度に実施された総合的な現地調査結果(河川調査、水質・底質調査)及び既往の知見を基にして、浮遊生態系及び底生生態系を連結し、ホタテガイの養殖形態を表現した個体成長モデルを組み込んだ新たな生態系モデルを開発した。

2. サロマ湖の環境

サロマ湖は、北海道のオホーツク海沿岸に位置する海跡湖である。湖面積は150 km²、最大水深は約18 mであり、2つの非常に狭い湖口（幅は各々約300 mと50 m）によりオホーツク海と連結している。湖水は一年を通じてオホーツク海とほぼ同様の塩分濃度に保たれるなど、オホーツク海の影響を強く受けている。一方、オホーツク海では季節によりその卓越水塊が入れ替わることが知られている。例年、5～6月以降は宗谷暖流水が支配的であり、11月以降は東サハリン寒流水の影響下に置かれる⁶⁾。これに伴い、湖内の水質は5～6月以降高温、高塩分を示し、9月上旬頃に水温の年間最高値を示して成層状態が形成される。この時期の15 m以深底層では低酸素層が形成される。その後、10月から成層状態が崩れはじめる。11月からは低温、低塩分の東サハリン寒流水の流入がみられ、12月上旬には湖内の大部分は東サハリン寒流水で占められる。水塊の交換に伴い、窒素も夏季のアンモニア態低肥沃型から冬季の硝酸態高肥沃型に変化する。

サロマ湖はその地形的特徴より、外海に比べて静穏な波浪状況であることから、養殖漁業が非常に盛んである。漁業はホタテガイ養殖が中心であり、湖面積の半分に当たる約77 km²がホタテガイ養殖水域として利用されている。養殖されるホタテ貝は湖内で成貝まで養殖されるもの（湖内養殖）と生後1年で湖外に地蒔きされるもの（育成稚貝）に区分され、年間漁獲量は前者のみで約7000トンにも及ぶ⁷⁾。

3. サロマ湖生態系のモデル化

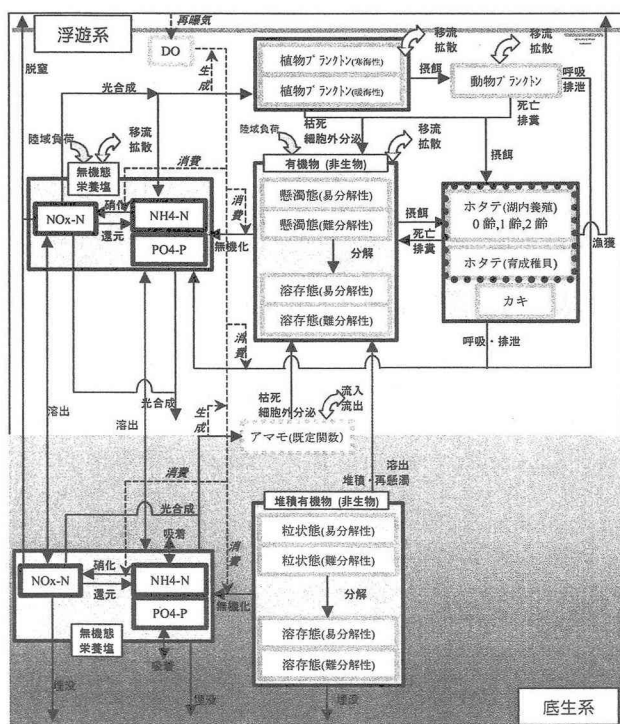


図-1 生態系モデルにおける物質循環図
(破線内は図-2～3参照)

本モデルは、水中の低次生産機構を表現した浮遊生態系モデルに対して、ホタテガイの養殖形態を表現した個体成長モデル、そして底泥堆積物中での有機物分解を考慮した底生生態系モデルを連結したものである。本モデルの物質循環機構を図-1に示す。モデルは、養殖ホタテガイの個体重の評価、さらには底泥悪化による栄養塩溶出量増加の評価が可能になるよう開発された。そのため、本モデルではホタテガイの養殖サイクルを詳細に表現した。また、養殖ホタテガイと浮遊生態系の相互作用のみならず、養殖ホタテガイの排糞等による堆積有機物の増加（底泥悪化）に伴い、底泥から水中への栄養塩回帰が増大するというフィードバック機構を表現するため、浮遊生態系と底生生態系の相互作用も考慮した。各モデルの特徴について以下に示す。

(1) 個体成長モデルの概要

サロマ湖においては、ホタテガイは湖内で約2年半養殖される。毎年8月に0齢貝が湖内に投入され、夏から冬にかけて2齢貝が漁獲される。これより、湖内は毎年3世代のホタテが混在する状態となる。このような湖内養殖形態を表現するため、本モデルでは0齢貝、1齢貝、2齢貝を別個の構成要素（コンパートメント）として取り扱った。また、0齢貝と1齢貝は各年の5月1日に加齢することにより、それぞれ1齢貝、2齢貝に移行する構造とした。従って、各世代毎の成長過程が時間的に追跡できる構造となっている。図-2に個体成長モデルにおける年齢の取り扱いを示す。

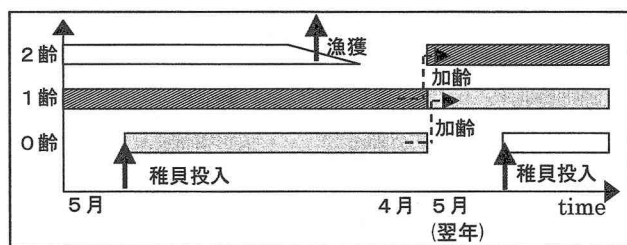


図-2 個体成長モデルにおける年齢の取り扱い

また、サロマ湖では適正な養殖漁業管理を目的として、漁業者により自主的に養殖個体数が把握、管理されている。そこで、本モデルでは各構成要素を生物量と個体数の2つの状態変数により記述した。ホタテガイの生理過程及び漁獲は、これら状態変数及び環境因子（水温、飼料濃度、DO）を基に表現した。モデル中では、0齢貝の投入、2齢貝の漁獲、そして死亡については個体数を基に計算し、摂餌、排泄、排糞に関しては生物量を基に計算した。モデル中では生物量及び個体数から時々刻々1個体当たりの生物量が計算されるので、これを基に個体数ベースで計算されるプロセスについても生物量変化に反映されている。そのため、既関数で与えられる漁獲個体数から、各環境因子を反映した漁獲量が自律的に計算される。なお、摂餌（濾水速度）については、ムラサキガイの成長に関する知見⁸⁾を参

照し、状態指標 (Condition factor) の概念をホタテガイの濾水速度データに適用し定式化した。状態指標は任意の殻高における標準個体重に対する現個体重の状態 (増減) を示すものであり、(軟体部炭素重量) ÷ (殻高)^β で表される。本式中の β は、軟体部炭素重量 W に対して殻高 L の累乗 ($W = \alpha \cdot L^\beta$) でフィッティングを行うことにより決定される係数である。図-3に個体成長モデルにおける生理過程の取り扱いを示す。なお、減耗過程については、既往の資料⁹⁾から、養殖形態変化時に減耗率 (一定値) を設定して個体数を減少させることにより考慮した。

カキについても同様に、生物量及び個体数の2つの状態変数を導入し、1年貝と2年貝を別個のコンパートメントとして取り扱った。

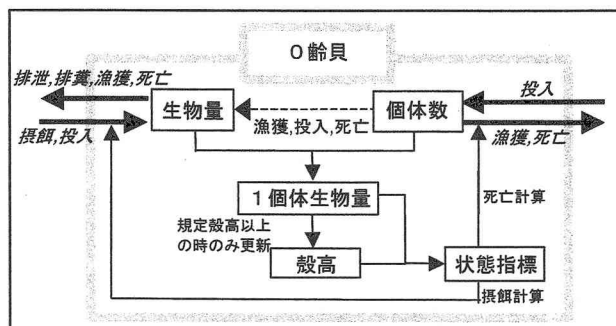


図-3 個体成長モデルにおける生理過程のコントロール (0 齢貝の例)

(2) 浮遊生態系モデルの概要

浮遊生態系モデルでは、既往の水質モデル^{例えば 10), 11)}を参考に水中の一次生産過程を記述した。モデル中で取り扱われる多くの構成要素は力学的に受動的であるため、海水の流速や渦粘性などの物理過程を別途流動モデルにより計算し、モデル構成要素の移流拡散計算に使用した。モデルの基軸となる植物プランクトンについては、オホーツク海での卓越水塊の入れ替わりにより卓越種が変化することから¹²⁾、寒流水に適応したグループと暖流水に適応したグループの2つの構成要素として取り扱った。これにより、夏季高水温期以上に春季の植物プランクトン増殖が顕著であるサロマ湖におけるホタテガイ飼料環境が表現可能となった。また、夏季の底層水質に大きな影響を与える底泥酸素消費量及び底泥栄養塩溶出量については、底生生態系モデルによる計算結果を使用した。逆に、浮遊生態系モデルで計算された沈降有機物量は、底生生態系モデルの入力条件となる。

(3) 底生生態系モデルの概要

底生生態系モデルでは、底泥中の有機物無機化過程を記述した。モデルでは、堆積物柱を上下二層に区分し、各層での堆積有機物濃度及び間隙水中の無機態栄養塩濃度の変化を鉛直一次元の移流拡散方程式¹³⁾に従い計算した (図-4)。モデルの上端は浮遊系最下層と連結されており、浮遊系で計算された沈

降有機物量を堆積有機物量の計算に際して考慮した。また、間隙水中の無機態栄養塩については、浮遊系最下層 (直上水) と堆積物上層間隙水との濃度差による拡散を考慮した。底泥中の生物化学過程に影響を及ぼす酸化層厚については、底泥中の酸素消費量計算結果及び直上水の溶存酸素濃度から、既往の知見¹⁴⁾を参考に解析的に計算した。なお、本モデルにおいては、詳細なデータが見受けられないことから、湖内底泥中に生息する天然ホタテガイ等のマクロベントスの影響は考慮していない。また、アマモについてはその生物量を既定関数として取り扱った。

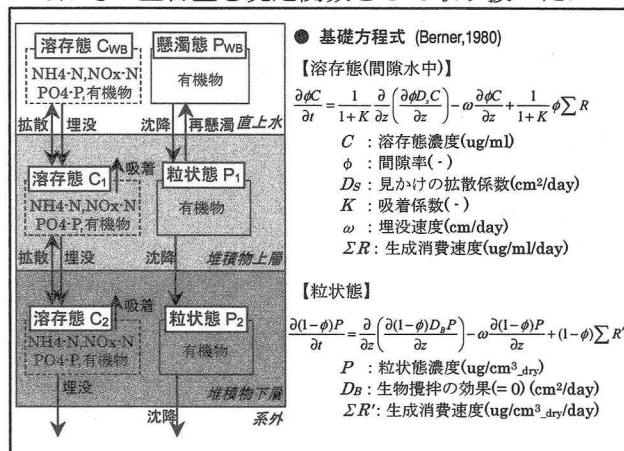


図-4 底生生態系モデル概要

4. モデルの適用と検証

(1) 計算条件

総合的な現地観測が実施された平成14年度を対象に生態系モデルの計算を実施した。また同時に、流動モデルの計算も実施した。計算に際しては、生態系モデル及び流動モデルともに図-5に示される格子 (水平2km) を設定した。なお、鉛直層厚は1mと設定した。

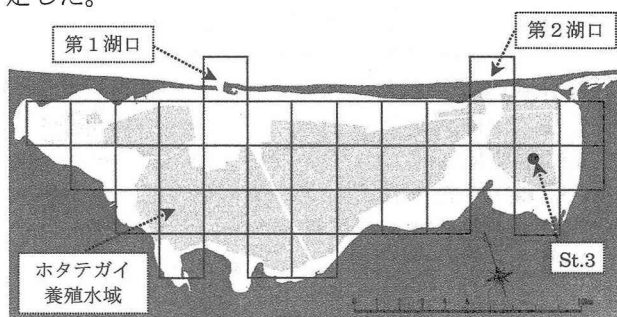


図-5 計算格子の設定

また、この計算に先立ち、別途湖口地形を表現する詳細な二次元流動モデルにより2つの湖口を通じた海水交換量を算出し、それを湖口位置での流入流出条件として設定した。その他の境界条件としては、外海での水温・塩分及び各水質濃度、海面風などの気象条件、河川 (主要8河川) からの淡水流入量及び水質濃度を設定した。計算は、最初の観測日である2002年6月18日の値を初期値と設定し、ホタテガイの養殖サイクル (2年半) を再現するため、平成

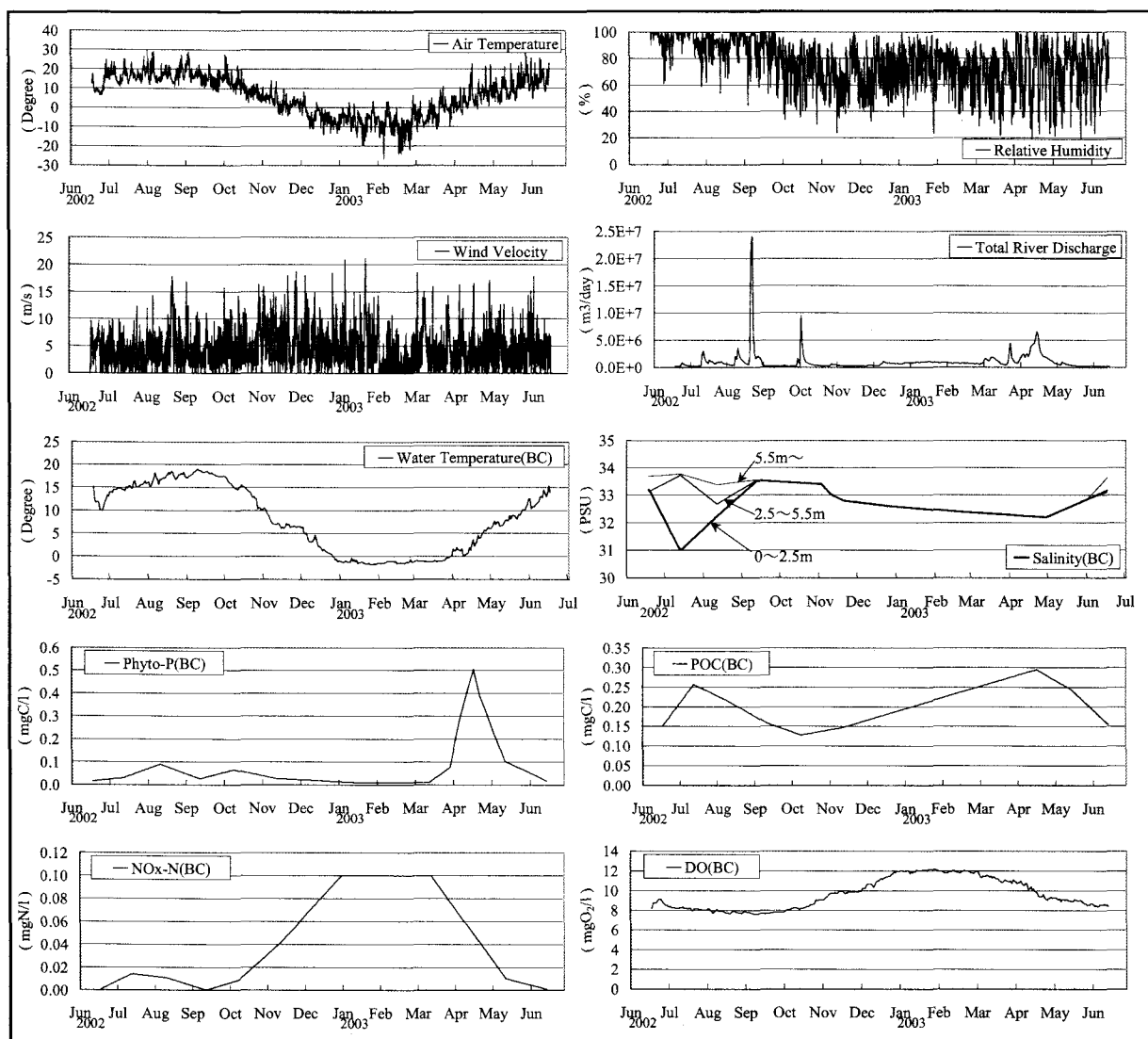


図-6 主な境界条件（気象条件，河川流量，外海水質濃度）

14年度の境界条件が3年間続くと仮定して実施した。各境界条件は，サロマ湖内及びその周辺観測地点での観測値を基に設定したが，外海の冬季水質など1ヶ月以上データが得られていない期間については，該当水域の既往知見^{15), 16), 17)}における観測値を参照することで補間した。また，底泥中の有機物量については観測値が得られていないため，既往の知見¹⁸⁾を参照し初期値を設定した。生態系モデル及び流動モデルの境界条件として使用した主なデータセットを図-6に示す。

(2) 現況再現性

各構成要素について，観測地点毎に計算結果と観測結果の時系列を比較した。図-7に観測地点St3（図-5参照）における水温，塩分，そして浮遊系の植物プランクトン，懸濁態有機物（POC）， $\text{NO}_x\text{-N}$ ， $\text{PO}_4\text{-P}$ ，溶存酸素濃度（DO）の比較結果を示す。また，底生系の堆積有機物の計算結果を示す。計算結果は3年間の計算期間においてほぼ定常的な周期変化を示したので，図中には計算開始後3年目の計算結果を示した。計算結果は，観測結果を概ね良好に再現している。また，水質に影響を及ぼす外海との

海水交流量（大潮時1潮汐 約 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ）及びその第1湖口と第2湖口の比（9:1）については，既往の知見¹⁶⁾とほぼ同様の結果となった。次に，図-8に計算開始時に0齢貝であった世代のホタテガイ湖内生物量及び個体数の時間変化，そしてそれらから計算される1個体当たりの生物量についての計算結果と観測値^{9), 19)}との比較結果を示す。ホタテガイの生物量については，計算結果と観測値からの推定結果は非常に良い一致を示した。生物量及び個体数から計算される1個体当たりの生物量についても，2齢貝の9月以降を除きよい一致を示した。2齢貝の9月以降のずれについては，この期間の湖内個体数が非常に少ないことから，湖内の物質循環には大きな影響は及ぼさないと考えられる。

(3) 計算結果の分析

数値モデルの計算結果を分析することで，平成14年度のサロマ湖水質の変動要因は以下のように考察される。浮遊系の植物プランクトン及び懸濁態有機物は夏季から秋季にかけての期間及び春季に増加している。夏季から秋季にかけての増加は，水温上昇及び陸域からの負荷量増加が主な原因である。また

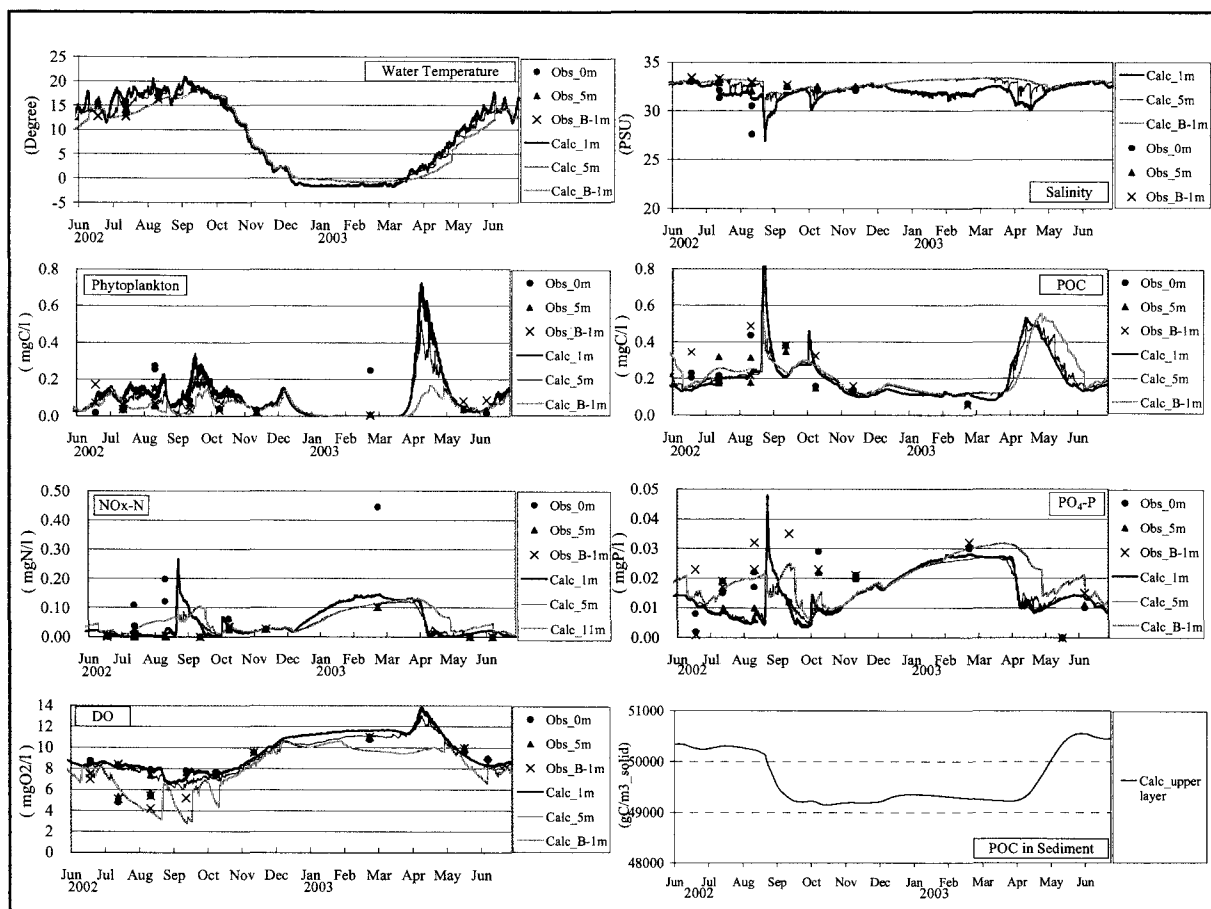


図-7 主な計算結果（水質及び底質）

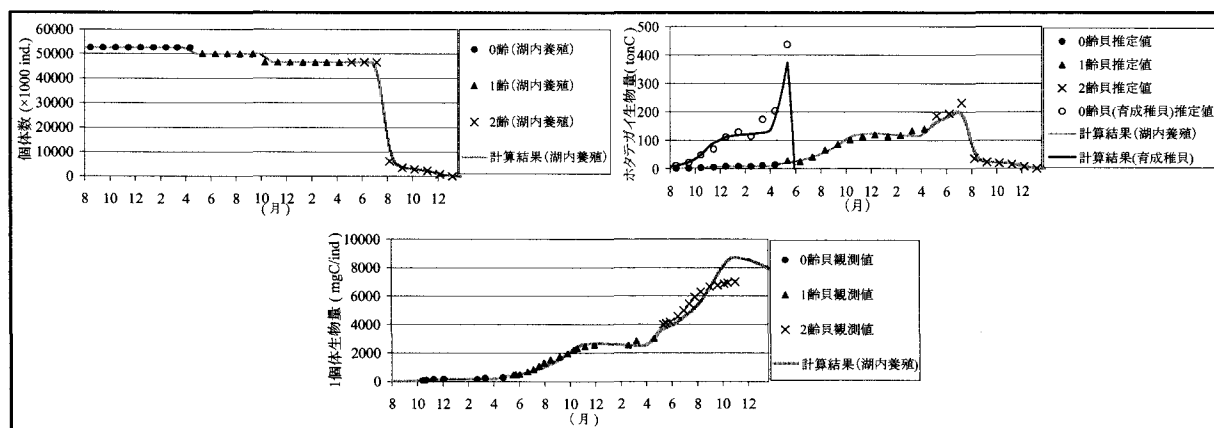


図-8 主な計算結果（ホタテガイ：計算開始時に0齢貝であった世代）

この時期には水温成層が形成され、底層では底泥による影響が大きくなり、酸素濃度低下や栄養塩濃度増加が生じる。これらは底泥有機物の無機化に由来するが、夏季、特に8月中旬の台風の影響による鉛直混合により、底層水温が上昇した後に顕著になっている。一方、冬季はオホーツク海の水塊交換により栄養塩濃度は高くなるが、水中では結氷により日射強度が低下するため、植物プランクトンによる一次生産は減少する。また、風による影響が弱まり河川水量も若干増加することにより、弱いながらも湖内に鉛直成層が形成される。春季には解氷によりブ

ルームが発生するとともにオホーツク海の水塊交換に伴い貧栄養となるため、栄養塩濃度は大きく低下する。そのため、その制限を受けて植物プランクトン濃度もその後低い水準で推移する。この春季のブルームは、湖内養殖ホタテガイの成長に大きな影響を及ぼす。特に、0齢貝については、ブルーム時に生物量が倍増している。計算結果から、湖内ホタテガイ生物量の最も多い5月におけるホタテガイに係る物質循環フラックスを算出した結果、湖内ホタテガイによる摂餌は $97.1 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$ であり、光合成生産($190.7 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$)のほぼ1/2に相当する。こ

れより、ホタテガイはサロマ湖生態系内物質循環において、主要な経路となっていると考えられる。

(4) モデルの適用限界

本モデルによる計算結果は、養殖ホタテガイ生物量及び水質についてその変動傾向を概ね再現できていることから、サロマ湖生態系における主要な物質循環動態はモデル内で概ね表現できていると考えられる。従って、本モデルは様々な水域環境管理施策に対する湖内生態系レスポンスの違いを定量的に見積もることができる有用なツールになるうる。ただし、本モデルでは沿岸の浅海部海底に生息が確認されている天然ホタテガイや、ホタテガイに付着する生物、河川流入のシルトの効果については、詳細なデータが得られていないため考慮していない。海底に生息する天然ホタテガイは、沿岸の局所的な水質に影響を及ぼすと考えられる。また付着生物量についても、水域により多寡があるという現場からの声も聞かれる。従って、今後湖内特定水域の評価や水域毎の差異などをより詳細に評価する場合には、詳細な空間分解能を設定するとともに、局所的に重要と考えられる物質循環経路についても十分検討する必要があると思われる。また、降雨イベントの影響を詳細に評価するためには、ホタテガイの生理過程において、シルトの影響を定式化できるデータの蓄積が望まれる。

5. まとめ

浮遊生態系及び底生生態系を連結し、ホタテガイの養殖形態を表現した個体成長モデルを組み込んだ新たな生態系モデルを開発し、サロマ湖に適用した。このモデルは、周囲の水質と相互作用した結果として任意の世代の養殖ホタテガイ個体成長を評価可能である。また、養殖活動による底質悪化に伴う水質への悪影響も評価可能な構造となっている。計算は、平成14年度のデータを対象に実施した。なお、ホタテガイの養殖サイクルを表現するため、計算においては平成14年度の条件を3年間繰り返し使用した。その結果、モデルはホタテガイの個体成長及び水質の季節変動を良好に再現した。また、フラックスの分析から養殖ホタテガイはサロマ湖生態系内物質循環における重要な要素となっていると考えられる。

今後は、本モデルの計算結果をより詳細に解析することで、サロマ湖内物質循環におけるホタテガイの果たす役割を十分検討することが望まれる。さらには、現地観測データの蓄積により、今後一層のモデル精度向上が図られるとともに、本モデルにより上流域の負荷削減や湖内養殖許容量をはじめとする水域環境管理施策が検討され、持続可能な養殖漁業の早急なる確立及び閉鎖性海域の環境保全が期待される。

謝辞：本モデルの構築にあたり、サロマ湖の環境保全をサポートする委員会委員及びアドバイザーの方々、サロマ湖養殖漁業協同組合、北海道立網走水産試験場からは、大変有用な御指導を頂いた。以上、ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本水産学会編：浅海養殖と自家汚染，恒星社厚生閣，1977.
- 2) 灘岡和夫，八木宏，上野成三：閉鎖性及び開放性沿岸域における海水流動と栄養塩・水質動態の観測と解析－英虞湾及び鹿島灘を例として－，水産海洋研究，No. 66(1)，pp. 57-59，2002.
- 3) 岸道郎：底泥による酸素消費量を考慮した養殖場数値モデル，沿岸海洋研究ノート，No. 32(1)，pp. 43-53，1994.
- 4) 西浜雄二：オホーツクのホタテ漁業，北海道大学図書刊行会，1994.
- 5) 久保正，佐藤芳和，駒木成：サロマ湖実験漁場環境調査，浅海域における増養殖漁場の開発に関する総合研究，東北水研，pp. 86-96，1975.
- 6) 駒木成ほか：流水期における海洋状況の特性と生物に与える影響に関する研究，流水災害に関する特別研究報告，科学技術庁，pp. 257-288，1975.
- 7) サロマ湖養殖漁業協同組合ほか：サロマ湖・オホーツク海における漁業の概況，2000.
- 8) Mohlenberg, F. and Rasmussen, E.K.: Size structured model of mussel (*Mytilus edulis* L.) growth, DHI-water and environment, 2001.
- 9) 富士昭編：サロマ湖におけるホタテガイ・カキの養殖許容量調査報告書，サロマ湖ホタテガイ・カキ養殖許容量調査専門委員会，1999.
- 10) Sohma, A. et al.: A new coastal marine ecosystem model study coupled with hydrodynamics and tidal flat ecosystem effect, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 43, pp 187-208, 2001
- 11) 中田喜三郎ほか：沿岸海域の三次元生態－流体力学モデル，公害資源研彙報，No. 12，pp. 119-133，1983.
- 12) 北海道栽培漁業振興公社：サロマ湖環境調査報告書，1983.
- 13) Berner, R.A.: *Early Diagenesis - A theoretical Approach*, Princeton University Press, NJ, 1980.
- 14) Sohma, A., Sato, T., Nakata, K.: New numerical model study on a tidal flat system - seasonal daily and tidal variations, *Spill Science & Technology Bulletin*, Vol. 6(2), pp. 173-185, 2000.
- 15) 多田匡秀，西浜雄二：サロマ湖水質環境調査，昭和62年度網走水試事業報告書，pp. 209-213，1988.
- 16) 北海道開発土木研究所：寒冷地圏域の海跡湖における環境保全に関する研究，国立機関公害防止等試験研究報告書，1988
- 17) 米田義昭：オホーツク海沿岸海域Ⅲ化学，日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，1986.
- 18) サロマ湖養殖漁業協同組合：サロマ湖底質環境の変化，平成8年度事業実績概要報告書，1996.
- 19) 蔵田護，千川裕，西浜雄二：サロマ湖における垂下養成ホタテガイの摂餌量，北海道立水産試験場研究報告，No. 37，pp. 37-57，1991.