

小川原湖におけるヤマトシジミの資源量変動と物質循環

鈴木誠二* ・ 西田修三** ・ 金城周平***
小野雅史**** ・ 中辻啓二*****

汽水湖沼は、栄養塩の供給が豊富で、停滞性の強い水域であるため、高い生産性を有する。小川原湖では、河川からの流入負荷量の増加が活発な一次生産を招き、富栄養化が徐々に進行している。近年では、局所的なアオコの発生やヤマトシジミの漁獲量の減少など、水環境の悪化が問題となっている。これらの問題は、湖内の物質循環過程の変化やそれに伴うヤマトシジミの資源量変化が原因であると考えられる。本研究では、鉛直一次元水質モデルを用いて小川原湖における物質循環機構を明らかにするとともに、個体成長モデルと個体数変動モデルを組み合わせた資源量変動モデルを用いて、ヤマトシジミの資源量変動特性を明らかにした。

1. はじめに

汽水湖である小川原湖では、上流河川より豊富な栄養塩が供給されるとともに太平洋と接続する下流からは塩分が供給され、空間的、特に水深方向に異なる水質構造を形成している。また、強い停滞性を有するために、一次生産が活発に行われ、多様な動植物が生息し、複雑な生態系を構築している。近年では、河川からの流入負荷量の増加が活発な一次生産を招き、富栄養化が徐々に進行しつつある。特に、局所的なアオコの発生や、優占種であり貴重な水産資源でもあるヤマトシジミの漁獲量の減少などが問題となっている。これらの問題は湖内の物質循環過程の変化やそれに伴うヤマトシジミの資源量の変化が原因であると考えられる。しかし、湖内の物質循環は未だ不明な点が多い。また、ヤマトシジミの資源量の変動特性とその原因についても不明な点が多い。

そこで、本研究ではこれまでに構築した鉛直一次元水質モデルを用いて、小川原湖における物質循環機構を明らかにすることを第一の目的とする。また、個体成長モデルと個体数変動モデルを組み合わせた資源量変動モデルを用いて、ヤマトシジミの資源量変動特性を明らかにするとともに、近年の資源量変動の要因を推察することを第二の目的とする。

本研究で対象とする小川原湖は、青森県東部の高瀬川水系の河口部感潮域に位置する汽水湖である(図-1)。塩分は湖と太平洋の水位の逆転に伴う塩水遡上により供給され、湖口への流入拡散、湖心への流下と底層貯留を経て、鉛直混合後、河道への流下と海域への流出という過程をたどり湖内塩分環境が形成され、長期的にはほぼ安定した塩分環境を保っている。また、周辺6河川からの

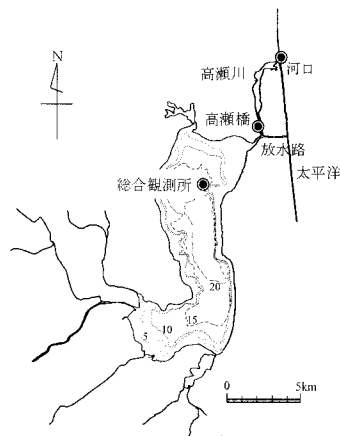


図-1 小川原湖と高瀬川

流入と底泥からの溶出により豊富な栄養塩が供給される。湖内では一次生産が活発に生じ、死滅、沈降、分解などの過程を繰り返しながら、様々な状態に変化して物質循環が行われている。また、小川原湖に高密度に生息するヤマトシジミは高い浄化能力を有し、植物プランクトンを含む水中懸濁物を濾過しながら捕食し、成長する。ピーク時には約3500トンもの漁獲量を有していた。近年資源量の減少にともない漁獲量も減少したが、現在でも年間約2500トンものヤマトシジミが漁獲によって湖外に運び出されている。

2. 物質循環特性

(1) 水質モデルの概要

図-2 は本研究で用いた水質モデルの概念図である。窒素循環機構をより詳細に解明するため、西田ら(2003)によって小川原湖に適用された水質モデルをアンモニア態、硝酸態の二態を考慮できるよう拡張した。また、鉛直一次元の物質収支は次式のように表され、この式を用いて水質の季節変動特性の解析を行った。

* 学生会員 修(工) 大阪大学大学院 土木工学専攻
** 正会員 工博 大阪大学大学院助教授 地球総合工学専攻
*** 正会員 修(工) 清水建設(株) 土木技術本部
**** 正会員 (株)建設技術研究所
***** フェロー 工博 大阪大学大学院教授 地球総合工学専攻

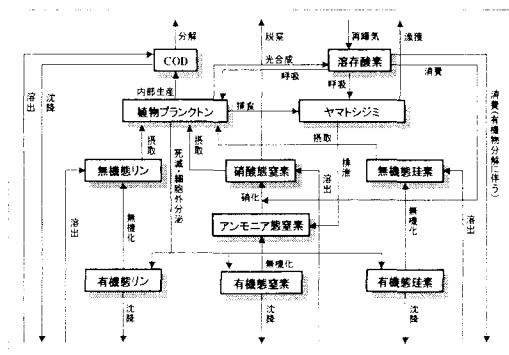


図-2 鉛直一次元水質モデル

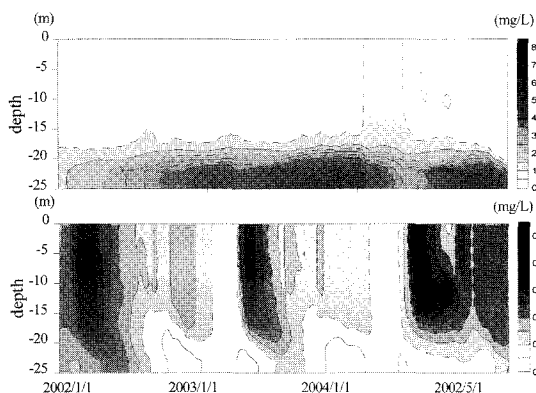


図-3 窒素の季節変動 (上: 無機態, 下: 有機態)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{A(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left(A(z) K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum S(C) \dots (1)$$

ここで、 C : 栄養塩濃度、 $A(z)$: 水深毎の湖盆面積、 z : 水深、 K_z : 渦動拡散係数である。渦動拡散係数については、風と密度成層の効果をとり込んだ。水質の季節変動だけでなく年変動もとらえるために、検証に十分なデータがそろっている、1993年、1994年、1997年、1998年、2000年、2002～2004年の計算を行う。本論文では富栄養化の原因となる窒素およびリンに関する解析結果について報告する。

(2) 計算結果と考察

2002～2004年の無機態窒素と有機態窒素の季節変動についての計算結果を図-3に示す。小川原湖は水深約18～20mに強固な塩淡水境界が形成され、上層と下層では全く異なった水質特性を示す。そのため、無機態窒素は1年を通じ塩水層で常に高い値を示す。しかし、鉛直混合が強まる秋季から春季にかけては塩水層から淡水層への供給が増加し、塩水層での濃度低下、淡水層での濃度上昇がみられる。2003年12月から2004年4月にかけて強風が吹き続ける期間が数回あった。この外力により上層への混合拡散がより促進されたことがわかる。有機態窒素は上層から中層で2月～3月にかけて増加している。

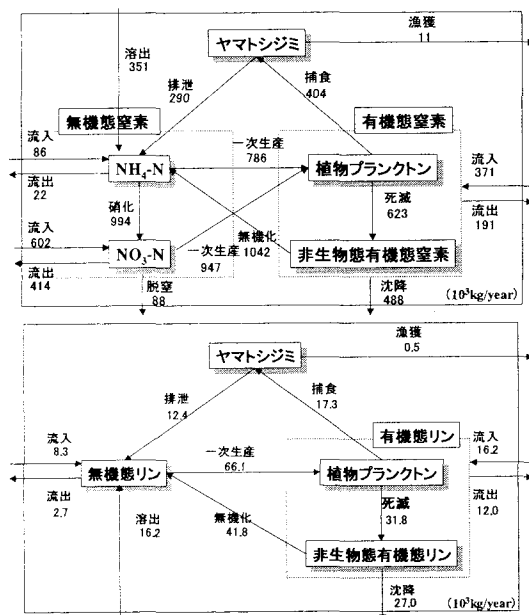


図-4 窒素・リン循環の年間総量

その後減少し、9、10月に再び僅かながら増加し、冬季には減少するという季節変動特性を有している。小川原湖では例年春季と秋季の二度、植物プランクトンのブルーミングがみられる。その影響で有機態窒素が増加しているものと考えられる。2004年の春季は2002、2003年と比べて有機態窒素濃度が高い。先に述べたように2004年春季には鉛直混合が強まり、塩水層からの栄養塩の供給が増え植物プランクトンのブルーミングが活発になったものと考えられる。

図-4に湖内の窒素循環およびリン循環の年間総量を示す。値は上記の8年間の計算結果の平均値を示している。窒素は、湖外からの総流入負荷量1059トンに対し、1828トンの一次生産が行われている。生物・化学反応による物質循環の時間スケールが湖水交換スケールよりも小さいために活発な一次生産が生じていると考えられる。特にリンは、総流入量24トンに対し一次生産量が66トンと窒素に比べ一次生産/流入量の比が大きい。一次生産に消費されるリンは窒素と比べ湖外からの供給よりも、湖内循環に依存していることがわかる。また、一次生産量の約30%をヤマトシジミが捕食しており、湖水の水質に大きな影響を与えていることがわかる。流入負荷量の約12%が脱窒により湖外に除去されており、水質の浄化に大きな役割を果たしている。底泥への沈降量が溶出量を若干上回るものの、ほぼバランスした状態にある。

図-5に湖内の無機態窒素、有機態窒素、湖水中の全窒素の月別変化量を示す。また、ヤマトシジミの窒素摂

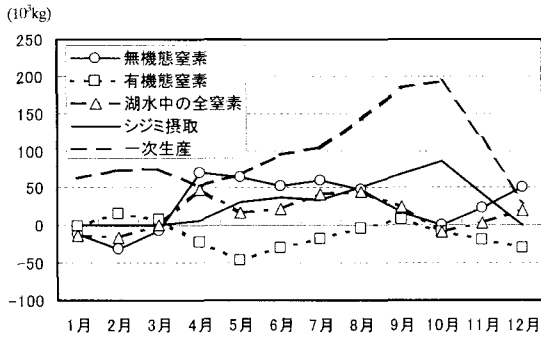


図-5 窒素の月別変化量

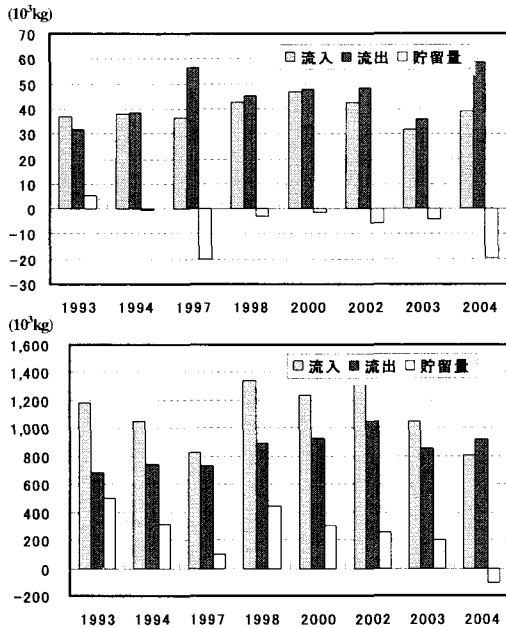


図-6 リン(上)・窒素(下)の年間流入流出および貯留量

収量と一次生産量の季節変化もあわせて図示した。小川原湖は停滞性が強いので、水温の低い1月から水温上昇期の5月にかけて毎月約70トンの活発な一次生産が行われている。藍藻類の増殖に適した水温となる7月から10月にかけて、より活発に一次生産が行われ、その後、減少するという季節変動特性を有している。しかし、有機態窒素の増加は2月、3月および9月にしかみられない。これは、一次生産による増加よりも、ヤマトシジミの摂取による減少や有機態窒素の無機化、沈降、湖外への流出が勝っていることによるものと考えられる。さらに、一次生産が最盛期を示す8～10月は、ヤマトシジミによる摂取の最盛期でもあるため、有機態窒素の増加が抑制されている。また、ヤマトシジミは体内に摂取した窒素を固定するため、湖水中の全窒素濃度の上昇を抑えていることがわかる。特に摂取量が最大となる10月は一次生

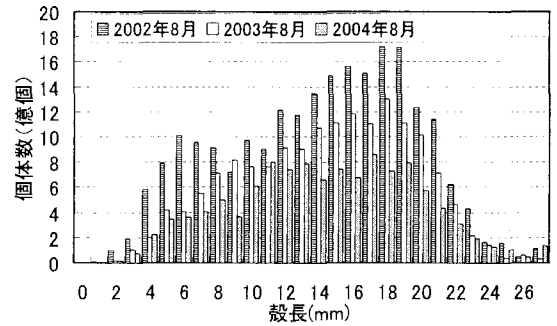


図-7 ヤマトシジミの殻長別個体数

産量が最大であるにもかかわらず、湖内中の窒素量は減少している。そのため、湖水中の窒素量は、一次生産が活発であるがヤマトシジミによる摂取量が少ない4月から8月にかけて増加する傾向にある。小川原湖では、秋季における植物プランクトンのブルーミングが過去20年間で5～30 $\mu\text{g/l}$ と大きな年較差を示す。これは、流入負荷量や底層からの栄養塩供給量の変化等の他に、ヤマトシジミの濾過能力の変化、ヤマトシジミの大量死等による生息量の急減などが引き起こしている可能性があると考えられる。

図-6に窒素、リンの年間貯留量の年変化を示す。窒素は年較差が大きい年平均して毎年約280トンが湖内に貯留されることがわかる。近年の観測結果に窒素量の増加が認められる。一方、リンは、貯留量の増加、減少が年ごとに異なるが、長期的には安定していることがわかる。

3. 資源量変動特性

(1) 資源量変動モデルの概要

図-7に小川原湖漁業協同組合・三戸地方農林水産事務所八戸水産事務所・青森県内水面水産試験場の3機関によって実施された資源量調査(2002, 2003, 2004)の結果を示す。すべての殻長で個体数が減少し、2年の間に全体で約50%の減少が報告されている。そこで、ここでは成長モデルと個体数変動モデルを用いて、ヤマトシジミの資源量の変動特性を明らかにし、資源量減少の要因を明らかにする。

図-8にヤマトシジミの資源量変動モデルの概要を示す。資源量の変動は、成長による個体重量の変動と、産卵・死滅・漁獲による個体数の変動によって決定される。成長モデルは、中村ら(2001)がウバガイに適用したものを鈴木ら(2004)が小川原湖のヤマトシジミに適用したモデルを使用した。軟体部の成長速度を次式に示す。

$$\frac{dW_c}{dt} = F \times AE - R - G \dots\dots\dots (2)$$

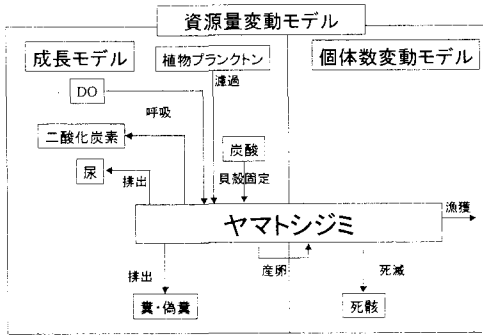


図-8 資源量変動モデル

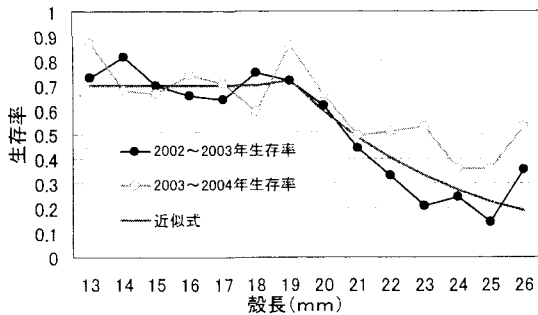


図-9 殻長別生存率

ここに、 W_c : 軟体部の炭素重量 (mgC), F : 摂餌速度 (mgC/day), AE : 同化効率, R : 呼吸速度 (mgC/day), G : 産卵 (mgC/day) である。ヤマトシジミの摂餌速度については、最大濾過能力を $7 \text{ L/g} \cdot \text{h}$ とし、水温依存を考慮した。また、酸素消費については位田・浜田 (1978) の提案式を用いた。産卵に関しては水温に依存させた。殻長は軟体部の増加時に成長するという条件の下、殻長: $l(\text{mm})$ と軟体部重量: $W(\text{mg})$ の関係式を用いる。

$$W = 1.0 \times l^{2.945} \dots\dots\dots (3)$$

一方、個体数の変動を次式で表す。

$$\frac{dn}{dt} = -n \times (1-m) - n \times f + k \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 n : 個体数 (個), k : 産卵による加入量 (個), m : 生存率, f : 漁獲率である。殻長毎の生存率は、資源量調査の結果および成長モデルを用いて以下に示す手法により推定した。成長量は $1 \sim 27 \text{ mm}$ の殻長毎に成長モデルを用いて1年後の値を算出した。成長量のばらつきを考慮し標準偏差1.6の幅をもたせて殻長別に個体数として分配する。また、殻長 18.5 mm 以上の個体は漁獲対象であるため漁獲量を差し引く。これらを自然死滅を考慮しない1年後の殻長別個体数とし、観測値と比較することによって生存率を決定する。2002年から2003年、および、2003年から2004年にかけての生存率の

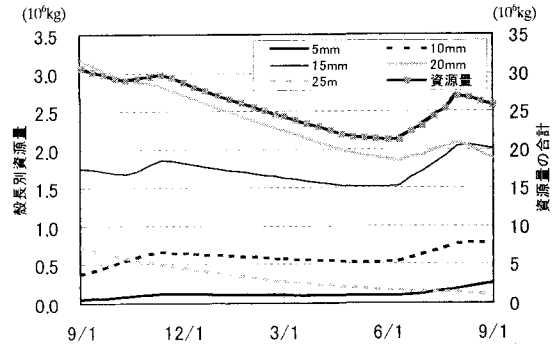


図-10 殻長別資源量の季節変動

計算結果を図-9に示す。殻長 19 mm までは生存率 0.7 の一定値をとり、それ以降は急激に低下することがわかる。生存率が低い殻長 19 mm 以上を対象とした漁獲は 19 mm 未満の漁獲に比べて、ヤマトシジミの生息環境に与える影響は小さいと考えられる。解析結果からすれば、経験的に決定された殻長 18.5 mm 以下の漁業制限は妥当であると考えられる。

(2) 資源量の季節変動

図-10に、上記のモデルを用いて算出した2002年9月から1年間の殻長別資源量と総資源量の季節変動を示す。ヤマトシジミの資源量は産卵期が終了する10月頃に少し増加するが、12月頃から減少を始める。その後、6月頃から増加し始め、8月中旬にピークを迎え、その後徐々に減少するという季節変動特性を有している。図-7に示した観測結果と同様に、1年間で約5000トンの減少がみられる。殻長 $20 \sim 25 \text{ mm}$ の資源量が減少し、殻長 $5 \sim 15 \text{ mm}$ の資源量が増加していることがわかる。近年の資源量の減少は、1年間の増加率が高い殻長 $5 \sim 15 \text{ mm}$ のヤマトシジミの減少が要因であると考えられる。つまり、産卵による新規の加入量が減少傾向にあると推察される。実際の加入量を算定するための産卵数や着底稚貝数等の実態調査は困難であり、そのため現時点では検証することができない。そこで、次節では、仮定の加入量を設定し、資源量変動モデルを用いて個体数分布の経年変化を計算し、現況の個体数分布と比較することにより、加入量が資源量に与える影響を明らかにする。

(3) 加入量が資源量に与える影響

加入量が毎年一定の場合 (case 1), 毎年20%ずつ増加した場合 (case 2), 毎年20%減少した場合 (case 3) の3ケースについて7年後の殻長別個体数分布を算出し、2002年の観測値と比較した結果を図-11に示す。Case 1の場合、殻長 7 mm と 13 mm の割合が多い2山型の個体数分布となる。観測結果では殻長 7 mm の個体数割合は低く、殻長 13 mm での極大値はみられない。Case 2の場合、殻長 7 mm の個体数割合がより高くなる。一

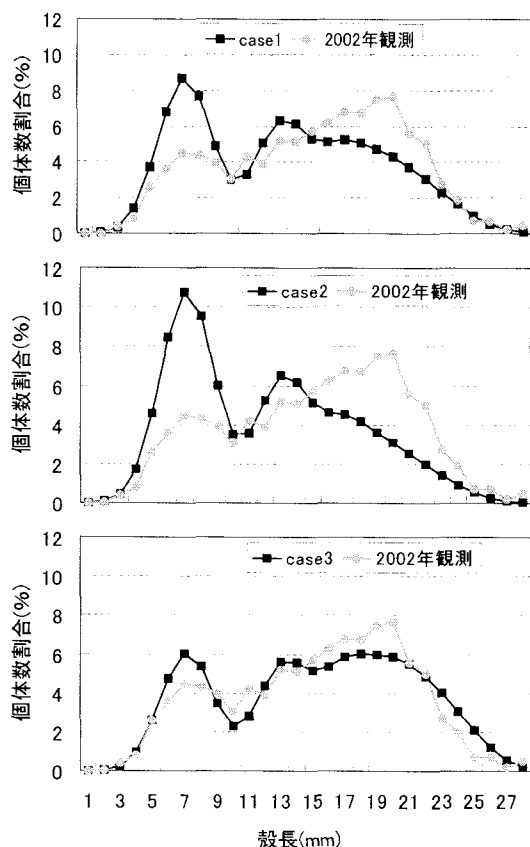


図-11 殻長別個体数分布

方, case 3 の場合, 殻長 7 mm の個体数割合が低下する分布となる。現況の殻長別個体数分布は case 3 の結果に近く, 小川原湖では年々加入量が減少している可能性が高いと考えられる。小川原湖では異常気象などによる水質変化が引き起こすヤマトシジミの大量斃死が, 資源量変動に最も大きく影響していると考えられる。今後これらの現象が資源量に与える影響について別途解析する必要がある。

4. おわりに

本研究より得られた主たる結果は以下の通りである。

- (1) 水質モデルを用いて水質の時空間変動特性を明らかにした。2004年の春季は2002, 2003年と比べて有機態窒素濃度が高かった。2004年春季は鉛直混合が強まり, 塩水層からの栄養塩の供給が多く植物プランクトンのブルームが活発になったものと考えられる。
- (2) 窒素, リンの循環について年間総量を計算した結果, 窒素については1059トンの湖外からの流入に対し, 一次生産が1828トン, リンについては24トンの流入に対し66トンもの一次生産が行われていることがわかった。

生物・化学反応による物質循環の時間スケールが湖水交換の時間スケールよりも小さいために活発な一次生産が生じていると考えられる。

- (3) ヤマトシジミの植物プランクトン摂取量が最大となる10月は, 一次生産量が最大となっているにもかかわらず, 湖内の窒素量は減少する。そのため, 湖水中の窒素量は, 一次生産が活発で, かつヤマトシジミによる摂取量が少ない4月から8月にかけて増加する傾向にある。
- (4) 窒素は平均して約280トンが湖内に貯留され, 富栄養化が進行している。一方, リンは, 貯留量の増減が年毎に異なるが, 長期的には安定している。
- (5) ヤマトシジミの生存率は, 殻長19 mm までは0.7のほぼ一定の値をとり, それ以降は急激に低下する。
- (6) ヤマトシジミの資源量は産卵期が終了する10月頃に少し増加するが, 12月頃から減少を始める。その後, 6月頃から増加し始め, 8月中旬にピークを迎え, 再び徐々に減少するという季節変動特性を有している。また, 殻長が20~25 mm の資源量が減少し, 殻長5~15 mm の資源量が増加する特性を有している。
- (7) 現況の個体数分布は, 加入量が年々減少しているとした仮想計算結果とほぼ一致しており, 近年, 小川原湖では年々加入量が減少している可能性が高いと推察される。

謝辞：資料提供にご高配いただいた国土交通省高瀬川河川事務所, ならびに, 青森県内水面水産試験場に感謝の意を表します。

参考文献

- 位田俊臣・浜田篤信(1978)：貧酸素欠乏にともなうヤマトシジミの代謝変動について, 水産増殖, 23, pp. 111-114.
- 小川原湖漁業協同組合・三戸地方農林水産事務所八戸水産事務所・青森県内水面水産試験場(2002)：平成13年度シジミ一斉調査報告書。
- 小川原湖漁業協同組合・三戸地方農林水産事務所八戸水産事務所・青森県内水面水産試験場(2003)：平成14年度シジミ一斉調査報告書。
- 小川原湖漁業協同組合・三戸地方農林水産事務所八戸水産事務所・青森県内水面水産試験場(2004)：平成15年度シジミ一斉調査報告書。
- 鈴木誠二・西田修三・金城周平・中辻啓二(2005)：小川原湖の水質変動とヤマトシジミの生息環境, 水工学論文集, 第49巻, pp. 1243-1248.
- 中村義治・金網紀久恵・磯野良介・三村信男(2001)：生活史に沿った二枚貝個体群の生態機能評価, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1230-1235.
- 西田修三・鈴木誠二・山中亮一・金城周平・中辻啓二(2003)：優占二枚貝を考慮した汽水湖の水質変動解析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1016-1020.