

汽水湖への塩分侵入の過程と条件

——茨城県涸沼流域の現地観測——

信岡尚道* ・三村信男** ・根本隆夫***
布目彰一**** ・齊川義則***** ・大竹佑馬*****

汽水湖の環境維持は、湖への塩分侵入とそれに伴う湖水交換の程度に依存する。しかし、低塩分の汽水湖は塩分侵入機構が複雑であり、系統だった観測が必要である。本研究では、茨城県涸沼への塩分浸入区間を対象に、船を往復させて捕らえた詳細な塩分空間分布の変化と、多地点に設置した塩分計の長期連続観測結果から、地形の凹凸の効果を含めた湖央までの塩分の浸入過程と、それに対する諸要因を示した。さらに、60ヶ月におよぶ塩分観測値と潮汐および河川水位データを用いて、塩分浸入の条件と頻度を求めた。涸沼湖内への塩分浸入は潮差の大きい時に加え気象潮による平均海面上昇時に起こること、浸入頻度は年に 10 回程度であることを明らかにした。

1. 緒 論

貴重な生物の生息場である汽水湖の環境維持は、湖への塩分浸入とそれに伴う湖水交換の程度に依存する。塩分浸入のプロセスを左右する要因には、潮汐と河川流、河川・汽水湖の地形、さらに干拓や河川改修といった人工的地形改変があげられる。これらの条件の変化によって汽水湖への塩分浸入量が変われば、生物資源量の減少や水質悪化につながる。

近年、茨城県涸沼では特産のヤマトシジミの減少と COD 全国ワースト 4 に入る程の水質悪化に直面しており、ヤマトシジミ増加策と水質改善策を検討するためには、塩分浸入特性の把握が基本的に重要である。

涸沼の年平均塩分濃度は、8 PSU 程度と海水に比べて薄い。このような低塩分の汽水湖への塩分浸入については、宍道湖（日比野ら, 1997）など数例の研究があるに過ぎない。塩水浸入過程は湖沼ごとに大きく異なり、これまでの研究成果を涸沼に適用することは難しい。したがって、汽水湖の塩分動態を体系的に理解するには、多くの湖沼の情報を蓄積することが必要であると言える。

本研究は、涸沼流域での現地観測を系統だって実施し、塩分の浸入過程とそれに対する諸要因の寄与の検討、さらに塩分の浸入条件の把握を目的としたものである。

2. 塩分動態の観測および計算方法の概要

涸沼には、外洋から本川・那珂川を 500 m、支川・涸沼川を 8 km 遡って到達する（図-1 (a) (b)）。以下では、那珂川と涸沼川の合流部からの距離 (km) で、地点 No. を表すことにする。涸沼川は河床の凹凸が際立っており、河道途中と湖口から湖中央部にかけて浅瀬が存在する。また 8.2 km 地点から 10 km 地点の間には幅 25 m、水深

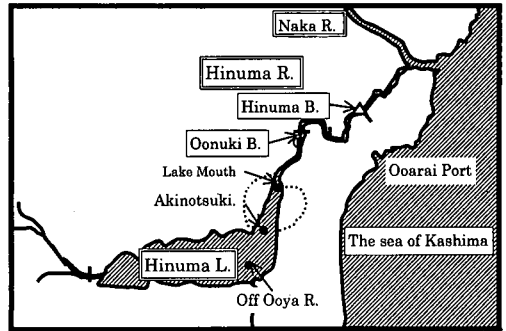


図-1 (a) 涸沼流域図

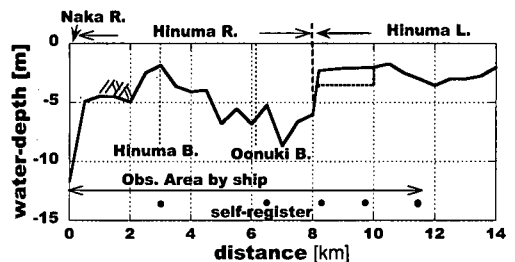


図-1 (b) 涸沼・涸沼川縦断面図

3.5 m 程度の人工的に作られた溝がある。湖内は、10 km 地点までの南北に伸びる浅瀬部と、それ以遠の東西に伸びる水深 2.5 m 前後の窪地部（湖央）にわけられる。

(1) 塩分の空間分布の観測

那珂川との合流部から湖央入口まで 11.7 km の区間を船で往復し 1 km 間隔で鉛直分布観測を行い、塩分の詳細な空間分布を測定した。測定には電気伝導率計（東亜電波工業社製, WM 22-EP）を用いた。この観測は 2001 年 11 月から 2002 年 12 月の間に合計 7 回おこなった。

(2) 塩分の連続自動観測

塩分の時間的動態をとらえるために、茨城大学、茨城県内水面水産試験場、(独法)水産工学センター水産工学研究所（桑原・齊藤, 2003）が共同で、図-1 (a) (b) に示す 5 地点の底層に自記式塩分計（アレック電子社製、

* 正会員 博(工) 茨城大学助手工学部都市システム工学科

** 正会員 工 博 茨城大学教授広域水圏環境科学教育研究センター

*** 茨城県農林水産部主任

**** 修(工) 東京コンピュータサービス株式会社

***** 茨城大学大学院理工学研究科

***** 鉄建建設株式会社

COMPACT-CT など)を用いて約1年間にわたる連続観測を行った。また、湖央入り口にあたる 11.7 km 地点の大谷川沖については、茨城県内水面試験場が 1997 年 8 月から測定している観測データも用いた。

(3) 外力データ

潮汐の水位データは茨城県大洗港湾事務所の観測値、那珂川(野口、河口から 38 km)と酒沼川(酒沼橋)の水位は国土交通省常陸河川国道事務所の観測値、上流酒沼川の水位は茨城県河川課の観測値をそれぞれ用いた。

(4) 数値解析

外力や地形の変化と塩分分布の関係を調べるために、三村ら(2002)の数値シミュレーションを用いた。外力である潮汐には、観測値と 60 分潮からなる予測値を用いた。酒沼川酒沼橋での予測水位振幅は、60 分潮からなる回帰式に対して最小自乗法を用いて算定した。

3. 湖央への塩分浸入過程

(1) 塩分の空間分布の変化

酒沼川の塩分分布の 1 例として、図-2 に 2002 年 12 月 19 日の観測結果を示す。図の (a) から (c) はそれぞれ、逆流の終わり、弱い順流、逆流の位相における結果である。図 (a) からは次のことがわかる。合流点の塩分界面が酒沼川の河床より高くなると塩分の遡上が始まる。合流点では緩混合状態であるが浅瀬の酒沼橋(3 km 地点)では強混合状態になっている。酒沼橋から湖口(8 km 地点)の間では、表層で低塩分である一方、底層に塩分濃度の高い水塊が滞留している。6 km 地点の自記式塩分計の記録にも底層の塩分濃度上昇がとらえられているので、底層の塩分は潮汐による逆流によって浸入してきたものといえる。

図 (b) (弱い順流)を見ると、6 km 地点前後の凹地の高塩分水はそのまま滞留しているが、合流点付近では順流により塩分が押し戻されているのがわかる。再び逆流に転じた図 (c) を見ると、今度は 6 km 地点前後でも強混合となっている一方、湖口(8 km 地点)から湖央に向かって底層で塩分の上昇が見られる。連続観測結果では湖央の方が塩分上昇が早く生じており、この事は河道途中の凹部に滞留していた高塩分水塊が逆流時に湖内に浸入したことを示唆している。

他の観測日でも、潮汐振幅の大きい大潮や中潮の期間には、同様の塩分動態傾向が見られた。また、小潮など振幅の小さい時には塩分水塊の移動距離は短かった。

(2) 塩分の時間分布

湖内への塩分浸入が活発に見られた 2002 年 11 月の、下流酒沼川から湖央に沿う塩分の連続観測結果を図-3 に示す。図-3 に示したのは、合流部から 6.4 km、8.2 km、10 km と湖央の 11.7 km 地点における塩分濃度の

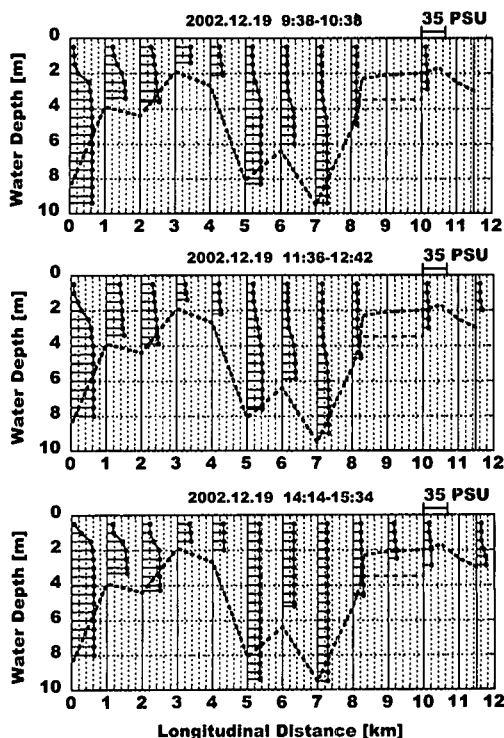


図-2 酒沼川・酒沼の塩分空間分布
(上段(a): 逆流, 中段(b): 順流, 下段(c): 逆流)

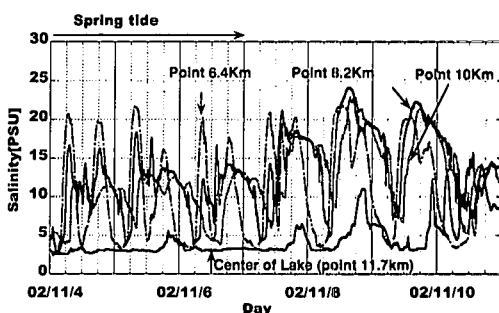


図-3 塩分浸入の時系列変化
(地点 6.4 地点 8.2, 水産総合研究センター観測)

時系列である。この期間は 8.2 km 地点、10 km 地点とも塩分の変動が周期的に発生していた。湖央(11.7 km 地点)への間欠的な塩分浸入は、6.4 km 地点から 10 km 地点の塩分濃度が同時に高くなっている時に発生している。8.2 km 地点までに大量の供給された塩分が、位相差をもって 10 km 地点、さらに湖央へと浸入していくことがわかる。注目すべき点は塩分挙動の地点間の時間差にあり、6.4 km 地点と 8.2 km 地点、8.2 km 地点と 10 km 地点の時間差に違いがあり、その違いは濃度上昇時と下降時でも異なる点にある。湖内の水位振幅は大洗から 2.5~3 時間遅れで良く追従していることから、この時間

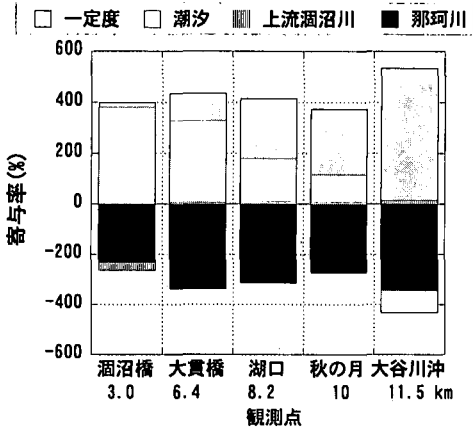


図-4 塩分浸入に対する外力の寄与率

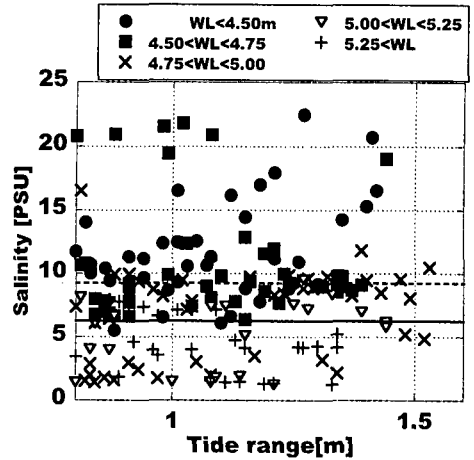


図-5 潮差と塩分濃度の関係

差は同一の潮汐振動流では説明できないものである。この塩分浸入の時間遅れおよび連続的な現象から間欠的な現象への変化は、湖口付近 (8.2~10 km 地点) の浅い地形が塩分浸入を阻害するフィルターとして作用した結果と考えられる。

(3) 塩分変動と外力との関係

塩分浸入の駆動力として潮汐，浸入を阻止する要因として那珂川と支川酒沼川の淡水流量があげられる。これらの外力と塩分について式 (1) を用いて重回帰分析をおこなった。

$$Y = a_0 + a_1 \times (X_1 - e_1) + a_2 \times (X_2 - e_2) + a_3 \times (X_3 - e_3) \quad \dots \dots \dots (1)$$

Y: 目的変数(塩分濃度), a_0 : 定数, X_{1-3} : 説明変数(那珂川水位(野口), 酒沼川水位, 大洗潮位), e : 各基準補正值である。各説明変数は塩分との相互相関分析に基づいて地点間の時間差を補正したものを用いた。右辺の各項の寄与割合を図-4 に示す。定数項が大きくなることは塩分の変動が小さいことを示す。

大洗潮位の影響は上流にいくほど急激に低下していることがわかる。湖央(11.7 km 地点)で大洗の影響が負となっているが、これは平均潮位が高い時期と、河川流量が多く塩分濃度が低下する現象が見かけ上重なったものである。那珂川野口の影響は一定しており、那珂川の河川流の増加は、塩分の下流酒沼川への流入を阻害することを示す結果となっている。酒沼川の影響はほとんど現れなかった。これは、酒沼川からの淡水流入が直に塩分変動に結びつかないこと、酒沼川の淡水が多いときには本川の淡水量も多いことによっている。

潮汐は、塩分浸入の駆動力であるが、河道に沿って振幅が減衰し、駆動力としても小さくなる。この効果が図-4 に現れている。一方、那珂川の河川流が増加すれば、酒沼川との合流点での淡塩海面を押し下げ、酒沼川

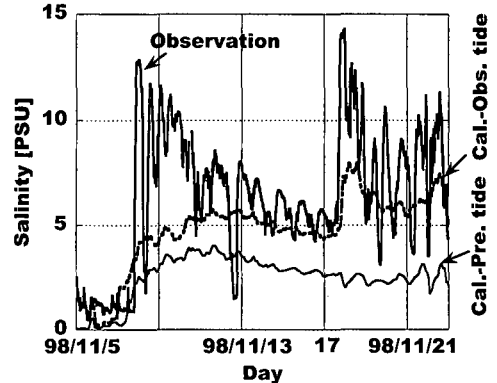


図-6 湖央の塩分濃度の時系列変化

への塩分浸入を小さくする。このように、那珂川河川流は境界条件の支配要因として働くため、酒沼川～酒沼に沿った各地点での寄与率(負)が一定に作用したものと考えられる。

4. 湖央への塩分浸入条件と頻度

(1) 塩分浸入の条件

上で述べたように、湖央への塩分浸入は潮汐と那珂川の河川流に左右される。そこで2002年を対象に、那珂川野口の水位(河床基準)をパラメーターにして、潮差と湖央の塩分濃度の関係を調べた。塩分量としては満潮時以降24時間の平均値をとった。結果を図-5 に示す。平均塩分濃度8 PSUを超えるのは野口の水位が4.75 m 以下の場合がほとんどであることは分かるが、このような整理では塩分濃度と潮差には関係が見られない。

湖央の塩分濃度の時系列変化を調べたところ、図-6 に示すように、ある時塩分濃度が急上昇し、その後徐々に低下するパターンがほとんどであった。このことは、

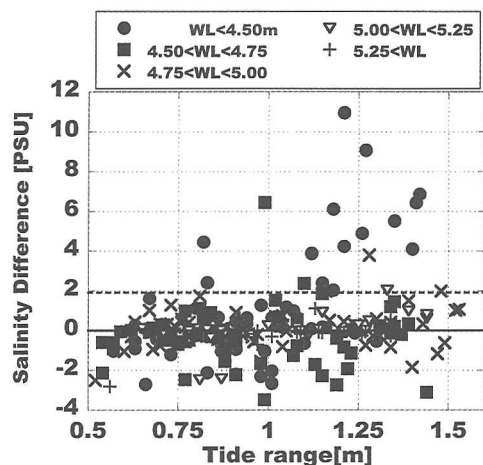


図-7 潮差と塩分濃度上昇の関係

3章で述べたように、高塩分水塊が間欠的に浸入することを示している。他方、徐々に塩分濃度が上昇する拡散的パターンは非常に少なかった。そこで、塩分濃度の急上昇と潮差の関係を調べた。塩分濃度の上昇分を、前後24時間の平均濃度の差で表したものが図-7である。野口の水位が4.5 m以下であれば、潮差が大きくなるにつれて急激な上昇が見られる。

しかし、潮差があまり大きくない時にも、塩分浸入が発生している。このときの潮位記録を調べたところ、予測潮位を超える気象潮の発生や平均海面の上昇が数多くみられた。その1例を図-8に示す。1998年11月16日から17日にかけて平均海面が上昇しているが、このとき図-6に示す塩分浸入が発生しており、平均海面の上昇と塩分濃度上昇が対応していることが見て取れる。

異常潮位が塩分浸入を引き起こすことについて、数値シミュレーションによる検証を試みた。潮汐の境界条件を観測値（天文潮＋気象潮）と予測値（天文潮）にそれぞれ設定して、塩分予測をおこなった。図-6に対応する期間の結果を見ると、天文潮だけでは塩分は浸入しないが、気象潮が加わると塩分浸入が発生する結果となった。

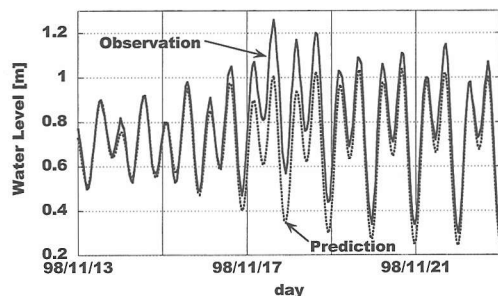


図-8 気象潮による水位の乱れ

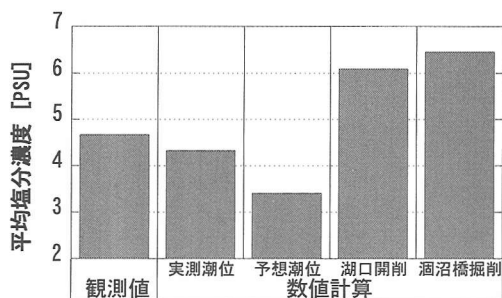


図-9 湖央（大谷川沖）の年平均塩分濃度比較

数値拡散によって、数値計算では高塩分水塊が一気に浸入する現象を十分には表せないなどの問題がある。しかし、気象潮や平均海面の上昇、または一旦低下した平均海面の回復に伴って急激な塩分上昇する観測事例が数多く見られた。以上のことから、湖央への塩分浸入は、単に潮差だけでなく、その上に気象潮が重畳していることが有力な条件になっていると結論づけられる。

両計算結果から年平均の塩分濃度を求めたところ、気象潮の効果で20%程度変化するという結果になった（図-9）。湖沼ではヤマトシジミの再生産量が多い年に、産卵期の塩分濃度が3.6～7.2 PSU以上である（根本ら、1999）ことから、気象潮の効果は重要と言える。

(2) 塩分浸入の頻度

1997年～2002年まで（欠測期間を除くと60ヶ月間）の、大谷川沖の塩分連続観測結果から塩分浸入回数を抽出した。塩分浸入の判定基準は、前後72時間の平均塩分濃度の差が2 PSU以上あることとし、連続して基準を満たした数日間を浸入1回と数えた。

塩分浸入に対する「基本基準」としては、観測データが整っている3 km地点の湖沼橋における水位差が80 cm以上（潮差の指標、大洗潮差1.25 m相当）、河川流として那珂川野口の水位が4.75 m以下を用いた。また、この基準以外の「気象潮」による水位変化に関しては、湖

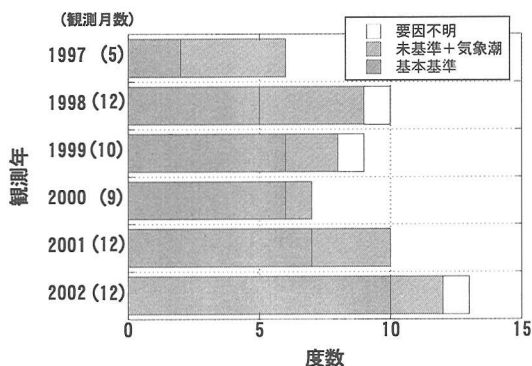


図-10 塩分浸入の頻度

沼橋の平均水位が予測水位より 5 cm 上昇し、かつ大洗の潮位の観測値と予測値間にも同様の傾向が見られる場合とした。

図-10 に各年の塩分浸入頻度を示す。「基本基準」とした潮差と那珂川の水位の組み合わせで、塩分浸入イベントの相当程度が説明できる。このほかに、気象潮や平均海面の上昇の影響で浸入したケースも少なくはない。なお、基本基準の中にも、気象潮の発生していた場合を含んでいる。以上の条件で説明できない塩分浸入もわずかにあり、「要因不明」として示している。一方、基本基準を満たしながら、塩分浸入と認められないケースが約 20% あった。塩分浸入の物理的メカニズムを含めて、さらなる浸入条件の詳細な検討が必要と言える。

沼沼湖央にまで塩分変化をもたらす高塩分水塊の浸入は、年 10 回程度と少ない。これは、海水による湖水交換が弱いこと、生活史の一部で塩分を必要とする生物にとって塩分供給が不足していることを意味する。現状の沼沼の塩分を含む水質環境は、ヤマトシジミなど汽水性生物にとって好適なものとはいえないであろう。

5. 塩分浸入に及ぼす地形の効果

塩分浸入に関係するものには、潮汐や河川淡水のみならず地形もあげられる。これらの中で、地形は操作可能な要因であることから、地形の効果を把握しておく必要がある。数値シミュレーションで、次の 2 ケースについて検討した。一つは、下流沼沼川の沼沼橋（地点 3 付近）の浅瀬を掘削して水深 3 m にした場合である（ケース 1）。昔は、大型漁船がこの場所を通過することにより、現在よりも水深が深かったと言われているところである。もう一つは、湖口付近で昭和 8 年に干拓が完成した部分を開削して干拓前の地形（図-1 の点線部）に戻した場合（ケース 2）である。両ケースとも正確な昔の地形を得られてないので、簡易的に地形を復元したものである。

計算結果から年平均塩分量を求めた結果を図-9 に合わせて示している。両ケースとも地形復元前（実測潮位）に比べ塩分量が増加していることがわかる。ケース 1 では、沼沼橋付近の浅瀬の掘削により、それより上流にある凹地への塩分蓄積（滞留）を活発にさせ、湖内への塩分供給を増進させる結果となった。ケース 2 では、湖口付近で反時計まわりの循環が顕著に表われ、この場所での塩分滞留を増進させることによる湖内への塩分供給を活性させる結果となった。

以上のことから地形の効果も塩分浸入過程に大きく影響すると言える。しかし、これらの地形変化以外で沼沼の水環境を変えたものとして、那珂川の砂利採取や河口部の処理などが考えられている。塩水浸入量に変化が生じた要因を特定するには、さらなる検討が必要である。

6. 結 論

本川から支川を遡ったところに位置する、低塩分の汽水湖沼沼への塩分浸入は次ぎのようにまとめられる。

(1) 本川那珂川の淡水量は沼沼川への塩水塊の浸入を大きく阻害する、(2) 沼沼川に入った塩水塊は、浅瀬により緩混合から強混合の状態に変化しながら進行するが、通常 1 潮汐で支川から湖口付近までしか運ばれない。これらにより (3) 湖口から湖央に向かうにつれて、塩分変動は潮汐周期とはほとんど関係ない間欠的なものとなる。特に湖口付近の浅瀬は塩水塊のフィルターとなり、湖央への塩水浸入の選別をおこなっている。(4) 河川の淡水量が少なく潮差が大きい時、また気象潮による平均海面の上昇時に、濃度の高い塩水塊がこのフィルターを通過し湖央へ流入する。(5) この湖央へ塩水塊が運び込まれる回数は年 10 回程度と少ないため、湖内は低い塩分濃度となる。(6) フィルター周辺の水域縮小はフィルター上へ送り込む、また蓄積する塩分量を低下させる。

沼沼への塩分浸入を左右する要因の中で操作可能なものは地形であり、河川改修や河道の拡幅、浚渫（浅瀬の削除、作渫）などの対策が考えられるが、その計画では、水質や生態系への影響を十分検討する必要がある。

謝辞：沼沼環境問題を共同で調査している（独法）水産総合研究センター水産工学研究所の桑原久実、斎藤隆両氏から、また国土交通省常陸河川国道事務所、茨城県河川課と大洗港湾事務所から貴重な観測データと御助言を頂いた。大沼沼漁業協同組合、沼沼ヨットハーバーの白田忠教氏には、観測へのご協力と有益な情報を頂いた。ここに、これら全ての方々に感謝の意を表する。

本研究は、日産財団の研究助成（代表安原一哉）、茨城大学工学部学部改革経費の研究助成（代表村上哲）、そして文部科学省地域貢献特別支援事業（茨城大学・茨城県）による研究成果の一部である。

参 考 文 献

- 桑原久実・斎藤 隆 (2003): 下流沼沼川におけるヤマトシジミ浮遊幼生の挙動特性, 海岸工学論文集 Vol. 50, 印刷中。
- 根本隆夫・中村 誠・杉浦仁治 (1999): 沼沼におけるヤマトシジミの研究-III, 茨城県内水試調査研究報告, 第 35 号, pp. 47-60
- 日比野忠志・福岡捷二・池内幸司 (1997): 季節および日々の気圧配置の変化に伴う閉鎖性汽水湖内部での流れ場の特性, 土木学会論文集, NO. 579 (II-41), PP. 93-103.
- 三村信男・信岡尚道・三田市圭史・布目彰一・横木裕宗・根本隆夫 (2002): 水質改善に向けた感潮支川・沼沼の塩分動態の解析 沼沼川・沼沼を対象として, 海岸工学論文集 Vol. 49, PP. 336-340.