

## 塩分浸入に着目した潟沼の環境解析

信岡尚道\* ・ 鈴木学\*\* ・ 長谷川慎一\*\*\* ・ 三村信男\*\*\*\*  
鯉淵幸生\*\*\*\*\* ・ 須能紀之\*\*\*\*\*

潟沼における約40日間の多点集中観測データを用いて、塩分浸入による流動場の変化と貧酸素水塊発生メカニズムの解明を試みた。観測期間中に台風に伴う湖全体の淡水化が一旦生じ、その後に塩水塊が浸入する状態で塩分濃度、流速や DO の変化を捉えた。観測データから潟沼において、遡上した海水が塩水楔を形成しながら湖内に浸入する時点ではまだ貧酸素化しておらず、その後密度成層が形成された後に貧酸素化することが明瞭に捉えられた。また長期水質観測データにより、潟沼の水質変化には DO・風・水温・微生物の活動が密接に関わっていることが分かった。

### 1. はじめに

全国的に海跡湖の淡水化が進む中で、残された汽水湖の多くは流域開発により厳しい水質環境にさらされている。また、淡水と塩水の微妙な変化により貴重な生物を含め様々な生物が生活しているが、これらの生息環境にも大きな影響を与えている。茨城県の潟沼でも、海水交換のある貴重な汽水湖として残っているが、水質は1997年に COD9.7 mg/l(全国ワースト4)、2000年には COD 9.5 mg/l(同5位)を記録するなど、長期的な水質悪化に直面している。コイやフナなど魚類の漁獲高減少の問題も顕著化する中、特に名産で市場価値が上がっているヤマトシジミについては、1974年から1979年当時には潟沼及び那珂川を合わせて約6千トンの漁獲高であったが、現在では2千トン前後に減少しており、資源量回復が重要課題である。ヤマトシジミの成貝は塩分耐性が0~23 psu と高い(中村, 2000)が、再生産に欠かせない産卵及び初期発生に必要な塩分濃度は、潟沼では10 psu(海水の1/3弱)程度と考えられている(茨城大学, 2005)。しかし、この濃度かつ水温条件(23℃以上)を満たすのは5年に1回程度であり、塩分濃度低下が資源量減少の原因と考えられている。そのため塩水浸入の活性化を含めた資源増殖対策が検討されている。

潟沼は平均水深2.1 m のごく浅い湖沼で、塩分の浸入、日射による水温上昇、風応力などの外乱に対して非常に敏感である。また、底面近傍の0 cm~20 cm の範囲に強固な貧酸素水塊の発生が確認された(三村ら, 2004)。そして貧酸素水塊の発生要因の1つとして、湖内底層で

の高塩分水塊の滞留が考えられ、塩分浸入促進策に相對する問題が明らかになった。しかし、塩分浸入によって湖内の流動場・水質環境の時空間変化の実態は明らかにされていない。

本研究では、水深の浅い湖である汽水湖潟沼を対象に系統的な現地観測を行い、湖内への塩分浸入メカニズムとそれによって引き起こされる、流動および溶存酸素の変化構造を解明することを目的とした。

### 2. 現地調査と解析データの概要

#### (1) 潟沼の概要

潟沼は、太平洋に面する茨城県大洗沿岸から那珂川を0.5 km 遡り支流潟沼川との合流部に達し、支流をさらに8 km 遡って湖口に到達する。湖口から2.5 km 程は幅狭く水深も1.5 m 程度と非常に浅い部分であり、そこを通り抜けると水深3 m 程度の湖中央部に到達する。湖は周囲20 km で、湖岸には水深1 m 程度の湖棚が存在するので、「浅いお皿の形状をしている」とよく例えられる。通常時には上流側の湖口まで水位が潮汐の影響を受けて変動する汽水湖である。

しかし、本川那珂川の相対的に大きな流量、水深が2 m~10 m で河床地形の凹凸が激しい下流潟沼川、さらに上述の湖口浅瀬によって、塩水塊は間欠的に湖の中央部に浸入する。まとまった塩水塊の浸入頻度は年に10回程度である(三村ら, 2002; 信岡ら, 2003)。

#### (2) 現地調査と解析データ

潟沼において、茨城大学、茨城県内水面水産試験場、水産工学研究所の3機関共同で長期定点観測を行ってきた。本研究で対象とした観測期間は、2004年1月~2004年12月で、観測点は湖内3地点(箕輪沖、大谷川沖、松川沖)である。自記式測定器による測定項目は、DO、塩分、水温、流速流向等である。自記式測定器の測定間隔は塩分が1分、その他の項目は30分である。また2004年10月18日から約40日間集中観測を行った。集中観測の前半では5地点でDO・塩分、3地点で流速・流向、箕輪沖では鉛直4層で塩分濃度を測定するとともに、ADCP

\* 正会員 博(工) 茨城大学講師 工学部都市システム工学科  
\*\* 茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻  
\*\*\* 正会員 博(工) 茨城大学講師 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  
\*\*\*\*\* 正会員 博(工) 茨城大学講師 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻  
\*\*\*\*\* 茨城県内水面水産試験場河川部主任

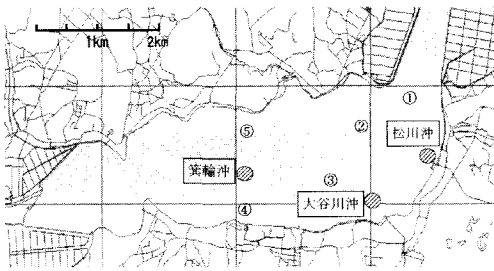


図-1 湖沼における観測地点

によって流速の鉛直分布も観測した。観測地点の配置を図-1に丸数字で示す。これらの時系列データの他に、大洗港の潮位、那珂川の水位、気温・日射(水戸市)、風速・風向(湖沼北岸の茨城町広浦)などのデータを用いて、流動や塩分、DOの動態とそのメカニズムを解析した。

### 3. 塩分浸入による流動場の構造変化と貧酸素化

まず、集中観測の結果を示す。集中観測の前半には、10月20日に台風23号が関東地方を横断して大量の降雨があり、那珂川・湖沼水系でも洪水が発生した。そのため、台風通過後17日間、洪水の影響が卓越して湖内は淡水化しDOは8 mg/Lと一定で、変動しなかった。しかし、11月15日に台風通過後初の塩分浸入が発生し、湖内の流動場構造と底層のDOに大きな変化が生じた。つまり、淡水状態に塩水塊が浸入した場合の、流動とDOの変化を明瞭に捉えることができた。この期間を後半とする。前後半の観測結果に基づいて変化過程を示していく。

#### (1) 流動・塩分濃度の変化

台風23号通過から9日後、10月30日の上げ潮の止まりの位相で船を用いて塩分縦断観測を実施した。湖口から河口へ1 km下った地点で塩分遡上端があり、那珂川の合流点においては満潮時に塩分差による強い密度界面の高さが僅かに湖沼川の河床より高い程度であった。湖口から下流へ3 kmと5 kmの地点に自記式塩分計を設置していたが1 psu程度のほぼ淡水状態の時間が長く、10 psu程度の遡上してくる塩分を感知したのはわずかに同

月28日～30日の3日で、その次は11月10日であった。このように湖沼下流の湖沼川でも塩分濃度が通常よりも低く、湖内ではほぼ淡水状態が継続した。

湖沼の中央部では11月15日の上げ潮時に台風後、始めて塩水浸入が発生した。図-2に湖中央部の箕輪沖における鉛直3水深の塩分濃度の時系列データを示すが、底面から20 cmと50 cmの水深ではほぼ同程度の塩分濃度の上昇(6～10 psu)が見られるのに対して、水面は淡水、水深1 mの塩分濃度は3 psu程度で両者の中間の値であった。このことから、湖中央部では厚み50～100 cm程度の塩水楔を形成していたと考えられる。一旦塩分が浸入すると湖中央部のくぼみに停滞し、強い鉛直成層を形成する。図-3は、箕輪沖における塩分浸入前後の流動をそれぞれ上段と下段で示している。塩分浸入前の淡水期間では流さの変動が上層、下層とも大きく、スペクトル解析でも潮汐の主要成分の周波数と流速の周波数が一致していた。

他方、塩分浸入後は流れが鈍化しており、流向の変動も詳細を見たとく相対的に緩やかに変化していた。大谷川沖(底40 cm)の流向の頻度割合を、塩分浸入前と後(各2週間)で表したものが図-4である。塩分浸入前は、順流方向の東向き流れが卓越しているが、塩分浸入後は逆流方向の西向き流れが卓越している。

以上より、湖内がほとんど淡水化していた期間には、全層にわたって流向が潮位変動に同期した交番流となるのに対して、塩分浸入後は底層で鈍化した流れで密度流の影響で逆流になる傾向があると伺えた。水面波形は塩分浸入前後で大きな差がないことから、塩分浸入後も上層の流軸上で交番流になっていると推測される。以上をまとめると、水深の浅い湖沼でも、塩水の浸入・停滞によって成層化し、流動構造に変化が生じると考えられた。

#### (2) DOの変動

集中観測期間における底層のDOの時系列観測結果を図-5に示す。台風23号通過後の約4週間、湖底付近のDOは8 mg/Lで一定していた。高いDOが続いた原因として、洪水によって大量の淡水が流下して湖水交換

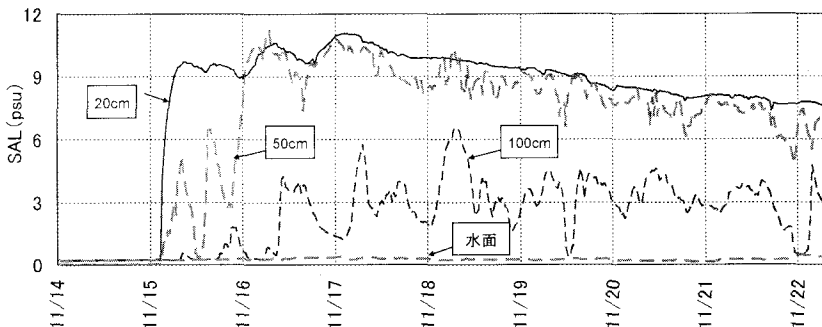


図-2 塩分の浸入と成層(湖底からの高さ、50 cmの観測値：茨城県内水面水産試験場提供)

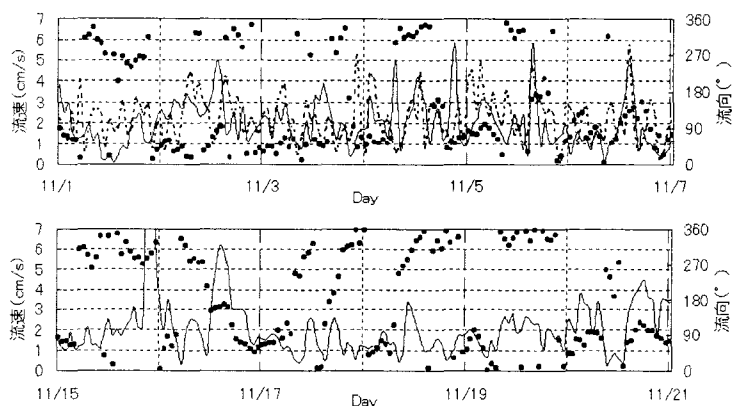


図-3 塩分浸入前後の流動変化（箕輪沖）：上段は浸入前，下段は浸入後．実線と黒丸は湖底から40 cm の流速と流向，点線は湖底から200 cm の流速

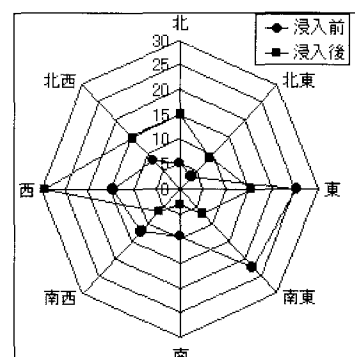


図-4 塩分浸入前後の流向頻度 (%) (大谷川沖 湖底から40 cm)

が促進されたこと、及び湖内の淡水化によって密度成層が弱く底層へのDO供給が促されたことが考えられる。台風通過後、4週間ぶりに塩分が浸入すると（11月15日）、DOは徐々に減少し11月19日には1.0 mg/Lまで低下した。その後11月26日まで低いDOが継続し、27日に淡水塊が通過することでDOは一挙に回復している。

この過程を見ると、海水が塩水楔を形成しながら湖内に浸入する時点ではまだ貧酸素化しておらず、その後塩水塊が停滞して密度成層が形成された後に徐々にDOが低下し、最終的に貧酸素化している。貧酸素化するには約4日かかっている。これは、成層後には上層から下層へのDOの供給が絶たれるとともに、湖底付近でDOが消費されるためである。このプロセスをモデル化するために、Streeter-Phelpsの式を適用して湖央の2地点（箕輪沖、大谷川沖）の脱酸素係数を計算した。Streeter-Phelpsの式では、微生物による有機物の分解過程と酸素供給（再曝気）を連立させているが、今回の計算では、密度成層のために湖底へのDO供給はないと仮定し、再曝気係数を0とした。得られた脱酸素係数はそれぞれ0.499, 0.379 day<sup>-1</sup>である。従来求められている脱酸素係数は水深3.05～6.10 mの緩慢流（0.03～0.15

m/s）では0.033～0.08 day<sup>-1</sup>、水深0.92～3.05 mの低速流（0.03～0.15 m/s）では0.05～0.67 day<sup>-1</sup>程度である（住友，1998）。観測点での水深は3 m、流れの平均は0.02 m/sであり両区分の境界に該当するので、潟沼の両地点の係数は大きいと言える。

この値の妥当性について簡易な検討をした。脱酸素係数 $K_1$ は、流速 $v$ と水深 $h$ の比に比例すると仮定して式（1）で推定する方法があり（Davis, 1991；原著はBasko, 1966）、この式が潟沼の条件でも適用できると仮定した。

$$K_1 = C_1 + C_2 \frac{v}{h} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $C_1$ 、 $C_2$ は自然環境場ごとの定数である。上で示した従来求められている低速流の流速、水深、脱酸素係数の値を用いて $C_1$ 、 $C_2$ を求めたところ、0.01と4.04となった。この値を用いて潟沼中央部の脱酸素係数を求めると $K_1 = 0.04 \text{ day}^{-1}$ となり、観測値の方がはるかに大きい、貧酸素化しやすい湖と言える。また強固な密度成層が発達している状態と考え、仮に水深 $h$ を成層厚0.5 mに置き換え式（1）に与えても $K_1 = 0.17 \text{ day}^{-1}$ で観測値の方が大きい。微生物の活動が活発であるためと考えられる。

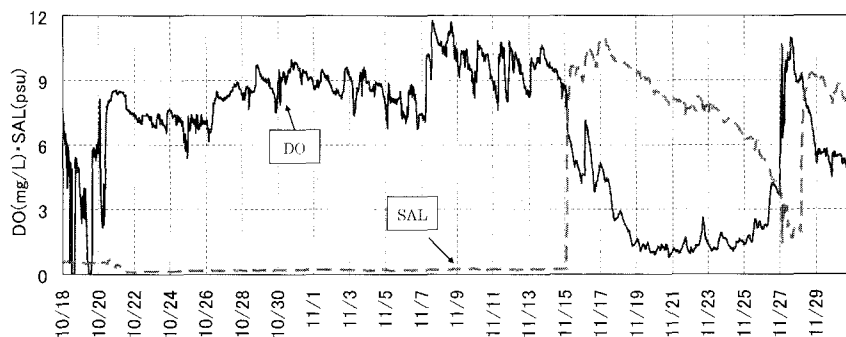


図-5 塩分浸入とDO変化：箕輪沖湖底から20 cm（DO値、(独法) 水産工学研究センター提供）

#### 4. 長期定点観測による年間変動の解析

##### (1) 流動の変化

長期定点観測の結果を解析することによって、涸沼の流動の基本的パターンを解析した。涸沼の流動は基本的には潮汐と河川流によって決まり、上げ潮時には上流向き、下げ潮時には下流向きの平均流が発生する。風も流動場を支配する大きな要因である。また、図-6に示すとおり年間を通して風速と流速それぞれのNS成分には負の相関関係があった。これは、涸沼のような極めて浅い湖沼でも、表層での吹送流と底層での補償流という2層構造の流れの場が構成されることを示している。

流況に対する各影響要因の寄与の程度を解析するために季節別の流速のNS・EW成分を目的変数、影響要因を説明変数とする重回帰分析を行った。取り上げた要因は、水温、大洗潮位、那珂川の水位(野口)、風速のNS・EW成分、河川水位である。解析結果は全ての季節でその他の要因が60%以上を占めた。この解析では、線形的な相関を仮定するとともに、要因と作用の間の時間ラグを取り込めないといった問題があることが反映した結果であろう。

##### (2) DOの変化

a) スペクトル解析: DOや各環境要因のパワースペクトルを求めることでその変動の周期性を確認した。その結果、風速には24時間の周期成分があり、また冬季のDOに限り周期性(24時間周期)が見られた。しかし、塩分濃度や冬以外のDOの変動には明瞭な周期性は見られなかった。

b) 相互相関と重回帰分析: 月別に相互相関分析を行

うことによって、DOと他の要因の間の相関と時間遅れを検討した。その結果、DOと風速に相関性のある月が見られ、相関係数は最大で0.5であった。時間遅れでは、風速の変動がDOの変動に2~4時間先行するという結果になった。しかし全般的にDOと潮汐や塩分などの環境要因の間には、高い相関は得られなかった。さらに、重回帰分析によって季節別のDOに対する各要因の寄与の検討を試みたが、相関の高い結果を得ることはできなかった。

c) 季節別のDOと・塩分の相関: 季節別のDOの変動と塩分濃度の関係を検討した結果を図-7に示す。

春・夏・秋には塩分濃度とDOの間に負の相関があり、塩分濃度が10 psu以上になるとDOは4 mg/L以下に低下する。これは、塩分浸入による密度成層の発生・底層での水塊の停滞と微生物によるDO消費が相まって生じると考えられる。低いDOの値が出現する割合が最も高いのは、箕輪沖では秋季あり、大谷川沖では春季であったが、この結果が意味するところは明確ではない。貧酸素化が観測されるメカニズムには、その場で貧酸素化が発生するものと、他の場所で貧酸素化した水塊の移動を観測する場合が考えられる(三村, 2004)。したがって、涸沼全域での貧酸素水塊の挙動の解明が必要であり、DOとともに底層の流動に関する面的な観測が必要である。

最も貧酸素水塊が発生すると考えられた夏は春・秋季に比べて、低DOの出現割合が少ないことが分かった。これは、水温成層は発達するものの、那珂川の河川流量が増加することによって涸沼への塩水浸入が低下したためと考えられる。また水深が浅いために夏、湖底の水温

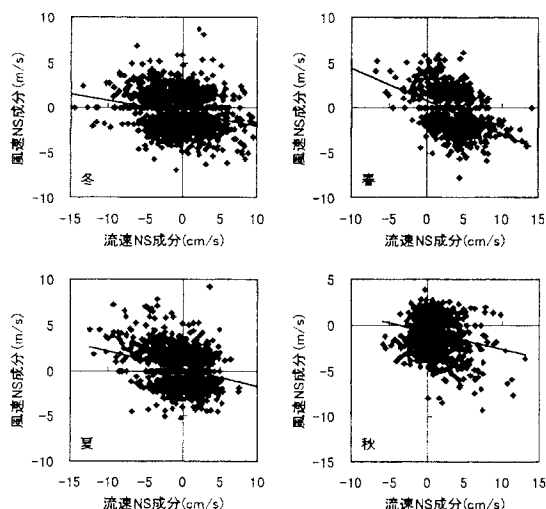


図-6 流速と風の相関: 流速、箕輪沖湖底20 cm; 風速、広浦(茨城県公害技術センター提供)

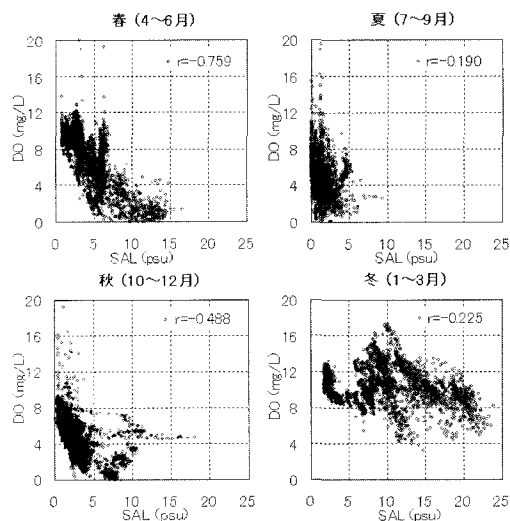


図-7 塩分浸入とDO変化: 箕輪沖湖底から20 cm (DO値, (独法) 水産工学研究センター提供)

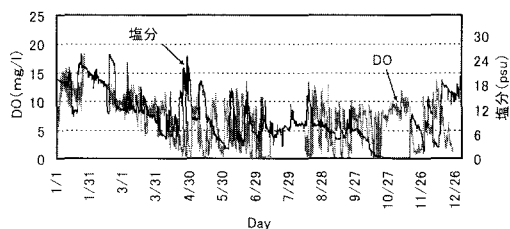


図-8 塩分と DO の季節変動  
(DO 値, (独法) 水産工学研究センター提供)

は28℃以上まで上昇することも、微生物の活動等の影響要因になる可能性がある。

他方、冬季には塩分濃度が高くても DO は低下せず、DO が4 mg/L 以上に維持されていることが分かった。冬季には、水温の低下によって湖底付近での微生物の活動が弱まり、酸素消費が少ないためと考えられる。

d) DO の変動：潟沼における DO 変化の特徴は、間欠的で急激な DO の変動である。この DO 変動は、従来から塩水の浸入・塩水塊の停滞によってもたらされるとされている(三村ら, 2004)。今回の観測では、下流潟沼川から湖内に遡上する塩水は DO が高く、DO を移入していることが確認された。この結果は、那珂川河口から下流潟沼川を遡上する期間には、海水を含む河川水が貧酸素化しにくいことを示している。しかし、この結果が年間を通じて当てはまるかどうかは不明である。潟沼湖内の塩分濃度は、冬季に高く夏季に低いという季節変化を示し、下流潟沼川の流況も変化する。図-8 には2004年の箕輪沖の塩分 DO の変化であるが、夏までは渇水年であって例年に比べ塩分浸入が見られた。DO も例年より高めで変動している傾向はうかがえるが、全般的な季節による塩分の高低は冬高く夏に低い結果となった。年間を通じて遡上する塩水が高 DO であるのか、遡上塩水の DO の季節変化、すなわち遡上塩水が湖内に DO を輸送するかどうかについては、今後より継続的な観測が必要である。

## 5. 結 論

今回の研究によって得られた主要な結論は以下の通りである。

(1) 塩分浸入によって潟沼の湖内環境は大きく変化する。特に DO は敏感に反応を示した。遡上してくる海水は塩水楔を形成しながら湖内に浸入する。この時点ではまだ貧酸素化しておらず、その後密度成層を形成し塩分水塊として湖内底層に滞留する。成層化後は上層から下層への DO の供給が絶たれ、さらに湖底から DO が消費されることによって水塊の DO は減少し、貧酸素化する。

(2) 淡水化していた期間には、全層にわたって流向が潮位変動に同期した交番流となるのに対して、塩分浸入後は底層で流れが鈍化する傾向がある。塩水の浸入・停滞によって上下の流動構造に大きな変化が生じる。

(3) 他方、浅い湖である潟沼でも表層での吹走流と底層での補償流の2層構造をもつので、強い風による底層の貧酸素状態の解消は期待できる。

(4) 冬季、潟沼において塩分濃度が年間で最も高いのにもかかわらず貧酸素化し難い。それは潟沼湖底で DO を消費する微生物の活動が極端に弱まるためである。水深の浅い潟沼では DO・風・湖底水温・微生物の活動が密接に関わっている。

**謝辞** 本研究は H13 年度から実施している茨城大学、茨城県内水面水産試験場と独立行政法人水産工学研究センター水産工学研究所の共同研究の成果の一部である。長期観測データを提供していただいた桑原久美氏、斎藤始氏、中村義治氏に感謝の意を表する。大潟沼漁業協同組合の皆様からは現地観測の支援を、茨城県大洗港湾事務所、同土木部河川課、同公害技術センター、国土交通省常陸河川国道建設事務所から周辺のデータ提供を頂いた。本研究は平成16年度文部科学省地域連携特別推進事業と平成16年度高橋産業経済研究財団研究助成の支援を受けて行った成果である。

## 参 考 文 献

- Basko, K. (1966) : An explanation of the difference between the rate of BOD progression under laboratory and stream condition, Advance in water research, Proc. of the third International Conf., p.43.
- Davis, M. L. and D. A. Cornwell (1991) : Introduction to Environmental Engineering, McGraw-Hill College, 822p.
- 茨城大学 (2005) : 茨城大学地域貢献プランー平成14年度～平成16年度 文部科学省地域貢献特別支援事業の成果ー, 茨城大学, 112p.
- 住友 恒・村上仁士・伊藤禎彦 (1998) : 環境工学, 理工図書, pp. 76-78.
- 中村幹雄編 (2000) : 日本のシジミ漁業 その課題と問題点, たたら書房, 265p.
- 信岡尚道・三村信男・根本隆夫・布目彰一・齊川義則・大竹佑馬 (2003) : 汽水湖への塩分浸入の過程と条件ー茨城県潟沼川・潟沼を対象にしてー, 海岸工学論文集, 第50巻 (1), pp. 401-405.
- 三村信男・信岡尚道・三日月圭史・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・潟沼の塩分動態の解析ー潟沼川・潟沼を対象にしてー, 海岸工学論文集, 第49巻 (1), pp. 336-340.
- 三村信男・吉野哲平・信岡尚道・横木裕宗・荒井将人 (2004) : 潟沼における DO の挙動とその支配要因, 海岸工学論文集, 第51巻 (2), pp. 941-945.