

水質改善に向けた感潮支川・湖沼の塩分動態の解析

——酒沼川・酒沼を対象として——

三村 信男* ・ 信岡 尚道** ・ 三日市 圭史***
布目 彰一**** ・ 横木 裕宗***** ・ 根本 隆夫*****

汽水湖である茨城県酒沼は、水質悪化に加え塩分低下の問題を抱えている。酒沼と外海とは本川的那珂川からさらに支川の下流酒沼川を介してつながっているため、海水交換は極めて複雑な様相を呈している。本研究では、酒沼流系を対象に現地観測と数値計算を行い、塩分動態および湖沼への塩分供給メカニズムの解明と水質改善のための湖水交換促進策の検討を行った。支川酒沼川の塩分動態は本川那珂川の影響を強く受け通常の感潮河川とは異なること、酒沼への塩分供給に関して酒沼川がフィルターの役目をしていること、作渚を実施することにより酒沼の塩分濃度増加や湖水浄化に繋がる可能性があることを明らかにした。

1. 緒 論

全国的に海跡湖が閉めきられて淡水化する中で、茨城県の酒沼は海水交換のある貴重な汽水湖として残っている。しかし、水質は全国ワースト4位を記録し、かつて豊漁を誇ったヤマトシジミの漁獲量が減少するなど、環境悪化に直面している。近年、ヤマトシジミの発生量が少ない年は塩分濃度が低いといわれている。水質汚濁を改善し、ヤマトシジミをはじめ豊かな汽水域生態系を再生させるためには、海水進入と湖水交換を促進する必要がある。しかし、酒沼と外海とは本川的那珂川からさらに支川（下流酒沼川）を介してつながっている（図-1）ため、海水交換は極めて複雑な様相を呈し、その実態はほとんど明らかになっていない。

そこで本研究では、酒沼流系を対象に現地観測と数値計算を行い、塩分動態および湖沼への塩分供給メカニズムの解明と水質改善のための湖水交換促進策の検討を行った。

2. 酒沼川・酒沼の概略

茨城県水戸市の東にある酒沼は、図-1に示すように、本川である那珂川の河口から1 km 遡った箇所、支流である下流酒沼川に分かれ、この下流酒沼川を8 km ほどさらに遡って到達する湖である。平均水位（TP）が20 cm 程度であるので、湖面水位は日常的に潮汐周期で振動している。面積は約9.3 km²、平均水深は2.1 m であり、湖容積は約1.95×10⁷m³となる。酒沼の上流には上流酒沼川が流入しており、茨城県土木部河川課による1990～1999年の調査では、年平均流量（下飯沼）は約3～12.6 m³/sである。したがって単純計算した湖水交換

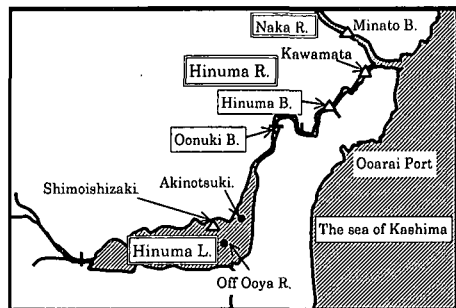


図-1 酒沼流域概略図

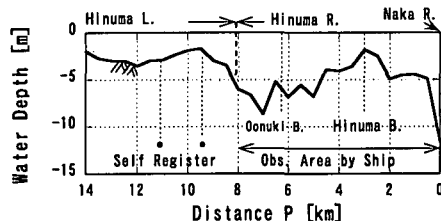


図-2 下流酒沼川酒沼縦断面図

は18～75日となる。

湖水交換日数が比較的短いにもかかわらず、水質はCOD値でみると1970年代から継続して6～10 mg/l程度と高い状態が続いている。ヤマトシジミは、1975年に6千トンの漁獲があったものが、2000年には3千トンに減少した。ヤマトシジミは産卵・幼生の成長のために6月から9月にかけて海水の1/4前後の塩分濃度が必要とされており、近年の漁獲高の減少は酒沼への塩分侵入が低下したことが一因ではないかと指摘されている。

下流酒沼川の縦断面概略を図-2に示す。合流点付近では酒沼川の河床高が那珂川に比べ急激に浅くなっており、途中の酒沼橋と湖口における浅瀬の存在など凹凸の激しい河床地形となっている。

3. 感潮支川・湖沼の塩分動態観測

3.1 観測方法

酒沼川での塩分の時空間分布と酒沼への侵入につい

* 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 修(工) 茨城大学助手 工学部都市システム工学科

*** 修(工) みずほアセット信託銀行

**** 学生会員 茨城大学大学院理工学研究科

***** 正 会 員 博(工) 茨城大学助教授 広域水圏環境科学教育研究センター

***** 茨城県内水面水産試験場

て、船上および橋上からの観測と自記式塩分計を用いた観測を行なった。観測日は船上等の観測が2001年7月22日と11月4日、自記式観測が同年10月30日～11月12日である。

11月4日の船上観測では、酒沼川に沿って約1 km間隔に測点を設け、ポータブル電気伝導率計（東亜ディーケーケー社製、WM-22 EP）を用いて鉛直方向に0.5 m間隔で塩分濃度を測定した。午前7時半から午後3時半までの8時間の間で5つの位相に対する塩分空間分布を捉えることができた。船上観測と平行して、酒沼川にかかる酒沼橋と大貫橋（那珂川合流点からそれぞれ約3 kmと約6 km上流、図-2参照）で電気伝導率計と電磁流速計（ケネック社、VP 2400）を用いて、塩分と流速、流向を30分間隔で、鉛直方向1 m間隔で同時測定した。

自記式観測は酒沼への塩分侵入頻度を調べることを目的にしたもので、塩分計（アレック電子社製 COMPACT CT）を酒沼の湖口から1.5 kmほど入った「秋の月」に設置した（図-1）。酒沼湖内ではこの他に、茨城県内水面水産試験場が「大谷川沖」で1997年から観測を続けているので、この塩分濃度連続データも解析に利用した。

なお、観測期間の大潮は10月30日～11月2日であり、11月4日は中潮であった。

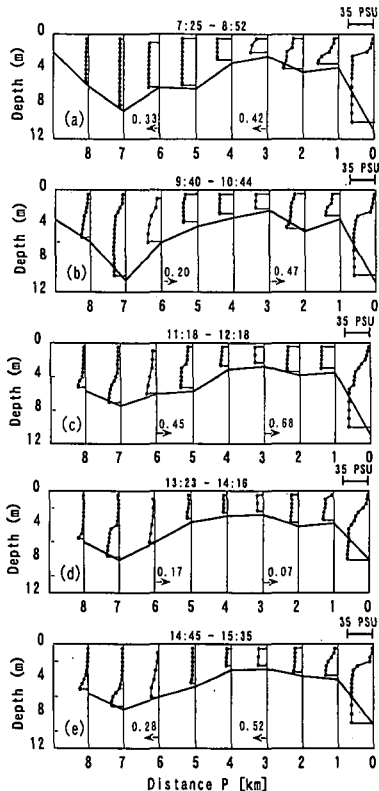


図-3 酒沼川の潮位位相に対する塩分縦断分布

3.2 下流酒沼川の塩分動態

2001年11月4日に観測された下流酒沼川の5つの潮汐位相に対する塩分の縦断分布を図-3に示す。図の縦軸は水深、横軸は1 kmごとの測点における塩分濃度を表している。横軸の右側が那珂川との合流点、左側が酒沼湖口である。図-3の(a)～(e)は時間順に示しており、(a)が上げ潮終了前、(d)が下げ潮終了の時間帯である。なお、酒沼橋と大貫橋の地点には流速と流向も合わせて示している。

1) 上げ潮終了前の位相（図-3a）：合流点の塩分分布には、水深2 m付近に明確な躍層が存在している。この躍層の位置は下流酒沼川の河床より高く、塩分が緩混合状態から酒沼川へ侵入していく傾向がみられる。混合形態は、酒沼橋（地点3）付近の浅瀬に向かうにつれ緩混合から強混合に変化している。また、酒沼湖口の塩分濃度が小さいことから、酒沼に到達する塩分は少ないのが伺える。

2) 下げ潮の位相（図-3b～d）：凹地形である地点5から地点7にかけて、水面付近では塩分濃度が低下する反面、底面付近の窪みに高塩分水塊が滞留している。また、下げ潮時には酒沼橋から那珂川との合流点付近まで強混合状態になり、合流点の躍層も不明瞭になっている。

3) 上げ潮開始位相（図-3e）：合流点の塩分躍層が回復し、図-3aと同様に塩分が酒沼川へ侵入している。この位相での特徴は、下げ潮時に地点5～地点8に滞留していた塩分が上流の酒沼に向かって侵入していく動きが現れていることである。

2001年7月22日の現地観測で観測された下流酒沼川の塩分濃度の分布は一層特徴的である。図-4に酒沼橋（下流側）と大貫橋（上流側）での観測結果を示すが、上流側の大貫橋の塩分濃度の方が常に高くなっており、また、合流点付近では塩分濃度が酒沼橋より高かった。つまり、河道に沿って/高塩分/低塩分/高塩分/のサンドイッチ状の水平分布が形成されていたが、これも前の潮汐サイクルで那珂川から侵入した水塊が下流酒沼川の河道にトラップされていたために生じたものであろう。

このように下流酒沼川では、凹地形の存在によって高塩分の水塊が河床付近にトラップされることによって、

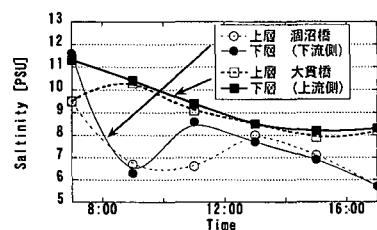


図-4 塩分水平分布の逆転現象

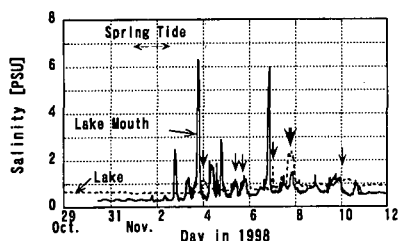


図-5 湖口と湖内の塩分分布

極めて複雑な塩分分布が現れることが分かる。この高塩分分水塊は下げ潮の位相で完全には流出しないため、上流側の塩分濃度が下流に比べて高いといった逆転現象を発生させる。また、滞留した高塩分水塊は湖沼に侵入する塩分の供給源になると考えられる。

3.3 湖沼への塩分供給頻度

では、下流湖沼川の凹地形に滞留した高塩分水塊はどのように湖沼へ侵入するのであろうか。この頻度を日記式塩分計を用いて調査した。

図-5 に 2 地点の塩分濃度の時系列結果を示す。実線が湖口付近 (秋の月)、点線が湖沼湖内 (大谷川沖) の結果である。塩分濃度が急激に上昇した場合を塩分の侵入とすると、湖口付近で侵入が観測されたのが大小合わせて 13 回、湖内では明確な侵入が 3 回 (太矢印)、小さい侵入 (細矢印) を合わせても 6 回である。この観測期間における満潮は 25 回観測されており、単純に潮の干満によって侵入するとはいえない。また、大潮の期間を図に記しているが、大潮の期間に顕著な侵入は生じていない。したがって、潮位変動に別の条件が加わる場合にのみ湖口付近への侵入が生じ、高塩分水が湖央へ達するにはさらに別の条件が必要と考えられる。

4. 数値モデルによる詳細メカニズムの把握

4.1 数値モデルの概要と検証

塩分侵入のより詳細なメカニズムを検討するため、河口から那珂川および湖沼流系を含む 3 次元流動・密度場数値モデルを構築し、1998 年通年を対象に水位、流速及び塩分分布の再現計算を行なった。

モデルは塚田ら (1995) が東京湾に適用したものをベースにして、鉛直移流項については佐々木ら (1996) と同様な陰的解法を用いた。細く湾曲して河床の凹凸が激しい湖沼川でも安定した解を得られるように、連立方程式の解法には対称 SOR 法 (例えば高橋・棚町, 1991) を用いて誤差を分散させ、移流項に適用したドナーセル差分のパラメータは可能な限り中央差分の重みが大きくなるようにした。この重みに関する工夫点は、中央差分による数値誤差を相殺する人工粘性項を導入したこと、大雨による那珂川の急激な水位上昇時に発生する計算不安

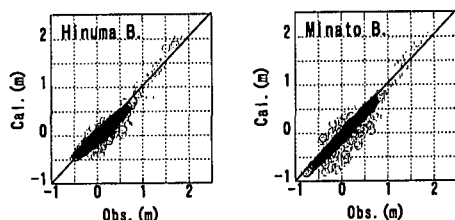


図-6 計算水位の検証

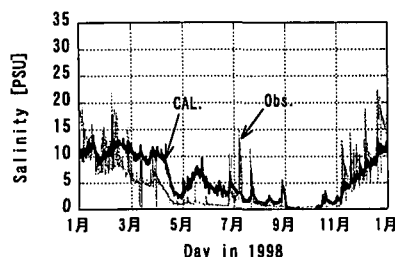


図-7 計算塩分濃度の検証

定を解消するために、パラメータ値を那珂川水位による可変値としたことである。

流動計算の境界条件には、那珂川河口で大洗港潮位 (茨城県大洗港湾事務所, 2000)、那珂川上流の水府橋水位 (国土交通省関東地方整備局常陸工事事務所観測) と湖沼川上流の下飯沼流量 (茨城県河川課観測) を用いた。計算格子間隔は水平方向と鉛直方向にそれぞれ 100 m と 1 m を取り、計算時間ステップは 30 秒とした。

計算の精度検証として計算領域内の水位 (国土交通省関東地方整備局常陸工事事務所観測) および連続塩分観測結果と比較した。水位の比較地点は図-1 に△で記した湖沼川の川又、湖沼橋、那珂川の湊大橋、湖沼湖内の下石崎の 4 地点である。このうち、湖沼橋、湊大橋での比較結果を図-6 に示す。横軸が観測値で縦軸が計算値である。両図から、位相の誤差による多少の水位差があるものの、増水時を含めて水位変動がほぼ再現できていることがわかる。図に示していない地点も同じ傾向であった。

塩分濃度を比較した地点は、湖沼湖内の大谷川沖である。結果を図-7 に示しており、横軸が時間、縦軸が塩分濃度である。短時間での塩分変化量に差が見られるが、春先から夏に向かって濃度が低下し、秋から冬にかけて塩分が上昇する傾向などが再現できていることがわかる。以上より、本モデルを湖沼を含む流系の流動・密度の解析に用いることができると判断した。

4.2 湖沼への塩分侵入の特徴と支配的要因

図-8 は、下流湖沼川と那珂川との合流点および湖沼湖内の月平均塩分濃度の経時変化を計算した結果である。この図と図-7 を合わせると、湖沼への塩分侵入には次のような特徴があることが分かる。すなわち、1) 湖

沼への塩分侵入には季節変動が卓越し、夏期に平均塩分濃度が低下し、秋から春にかけて平均塩分濃度が高くなること、2) この傾向は沼沼内だけでなく下流沼沼川でも顕著に見られること、3) 沼沼内への高塩分水の侵入は短周期で繰り返す間欠的なイベントとして発生すること、である。したがって、沼沼への塩分侵入は、季節変動といった長期的変動に短周期のイベントが重なった構造になっていると理解される。

下流沼沼川と沼沼への塩分侵入を支配する水理的要因としては、潮汐と那珂川の水位（流量）及び沼沼に流入する上流沼沼川の流量が考えられる。そこで、那珂川の水位と潮位振幅を+20%、上流沼沼川の水位を流量換算で±20%変化させた4ケースの計算を行い、沼沼湖内の塩分濃度の応答を調べた。それぞれのケースにおける湖内の年平均塩分濃度の変化量は図-9に示すとおりであるが、もっとも大きな変化量をもたらすのは那珂川の水位（流量）の変化であることが分かった。さらに、図-8で那珂川の中流部（野口）における月平均流量の経時変化との関係を見ると、下流沼沼川及び沼沼の平均塩分濃度と那珂川の流量は明瞭な逆相関の変動を示しており、この点からも沼沼への塩分侵入が、那珂川の流量の増減に左右されることが裏付けられる。

以上の結果から、那珂川と下流沼沼川及び沼沼への塩分侵入の大局的關係は、那珂川の流量が増加する夏期には那珂川河口付近で塩水くさびの侵入が押さえられる結果、下流沼沼川および沼沼への塩分侵入は低下する。一方、那珂川の流量が減少する冬期には、塩水くさびが河

道に深く入り込む結果、沼沼への塩分侵入が促進される、というものであると考えられる。

こうした長期変動の上に、より短い時間スケールで高塩分水の侵入イベントが生じている。これは、3.で示したように潮汐を基本的駆動力としており、下流沼沼川の河道中にトラップされた高塩分水塊が湖口の浅瀬を乗り越えて沼沼に侵入する現象である。しかし、最終的に塩水侵入をもたらす要因や侵入量を支配する要因は明らかではない。

4.3 塩水をトレーサーとした湖水交換

海水侵入による湖水交換能力について検討を行なった。まず、式（1）を用いて、湖口を通過する海水成分の量を数値計算より求めた。

$$Q = h u s / s_{\text{sea}} \quad \text{..... (1)}$$

ここに Q ：海水成分の通過流量、 h ：水深、 u ：流速、 b ：川幅、 s ：断面通過塩分濃度、 s_{sea} ：外洋の塩分濃度である。

潮汐の往復流による水塊には、これまでに多くの研究者が指摘しているように（例えば柳，1985）、上げ潮で流入したものが直後の下げ潮で流出するだけで、湖水交換に寄与しない量が存在する。潮汐波は不規則であるため、流入した水塊が数潮汐後に湖水交換に寄与せずに流出するものもある。そこで式（1）を、ほぼ月齢周期にあたる1ヶ月間で積分した海水量を算出した。湖口（p9.5）における各月（横軸）の海水成分の流入出量（縦軸）を図-10に示す。流入出量の正の値が流入、負の値が流出である

海水成分は10月～2月に流入、3月～9月に流出している。流出量の合計は $6.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ であり、海水成分が湖水交換へ寄与した目安量と考えられる。この量は、湖水容積の約32%、同年に上流河川から流入した淡水の年間量の約7%にあたる。潮汐による湖水交換には、那珂川から沼沼川に逆流する淡水の寄与、1ヶ月より短い周期での流入出による寄与もあることを考慮すると、潮汐による水塊移動が沼沼の湖水交換へ寄与する量は無視できないほど大きいといえる。

湖水交換に寄与する海水成分水塊が、下流沼沼川から沼沼に侵入する形態を調べる目的で、1時間間隔で海水

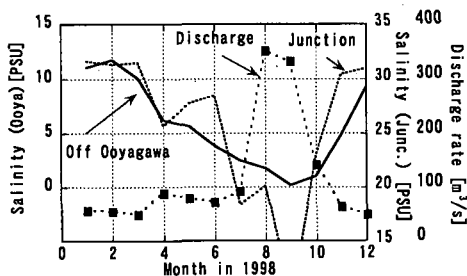


図-8 月平均塩分濃度の関係

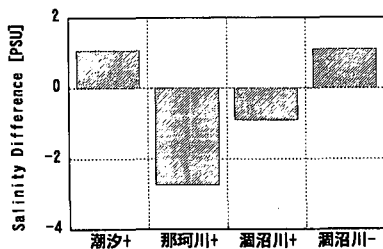


図-9 感度分析による塩分量変化の平均値

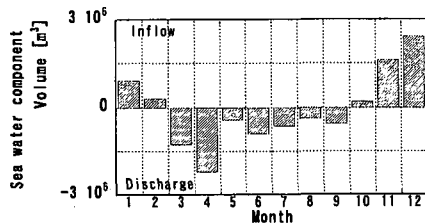


図-10 海水成分の流入出量 (p. 9.5, 1998 年)

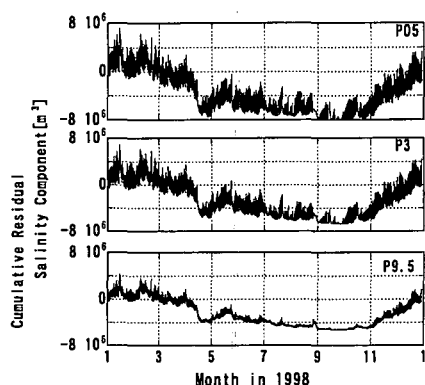


図-11 塩水通過量累積値と潟沼湖口の関係

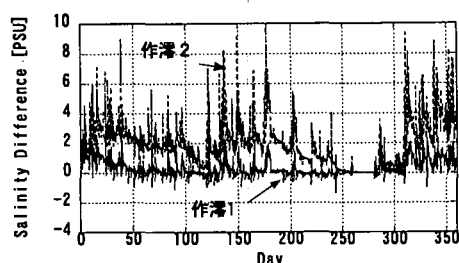


図-12 作渚により湖内の塩分変化量

成分の流入・流出累積値を求めたものが図-11である。上段から、下流潟沼川の合流点付近 (P0.5)、潟沼橋 (P3) と湖口 (P9.5) である。那珂川との合流点付近、潟沼橋では1潮汐間の変動が大きいが、湖口に至ると変動が小さくなっている。つまり、下流潟沼川が塩水の移動に対してローパスフィルターの役割を持っており、潟沼内に侵入し湖水交換に寄与する量を抑えている可能性があると言える。

4.4 浅瀬の作渚効果

下流潟沼川のフィルター効果は地形の凹凸が原因と考えられるので、凸部の浅瀬を掘削した場合について計算を行なった。具体的には、次の2つのケースについて検討した。

Case-1: 湖口から湖央まで水深を最低3mとなるように100mの幅で作渚を行なった場合

Case-2: 潟沼川の水深を最低4mとなるように掘削して、Case-1の幅を200mに取った場合

なお、幅100mとしたのは、格子幅の都合上である。

Case-1と2による湖内 (大谷川沖) の塩分濃度の上昇量を図-12に示す。対策無しの場合に比べ、Case-1の方が塩分濃度が高く、Case-2は更に高い。潟沼川の掘削や湖口の作渚をすれば底層における塩分侵入を促進し、塩分の供給と湖水交換能力を高めることができる。

5. 結 論

1) 下流潟沼川における塩分動態の特徴は、平水時の上げ潮時には、潟沼川の合流点付近では緩混合となりやすく、浅瀬では強混合となる。下流端 (合流点) の塩水塊は1潮汐では潟沼内まで到達せず、下げ潮時に河道中の水深が大きな凹部分の水底付近に停滞する傾向がある。増水時には那珂川の淡水が潟沼川に逆流し、上流側の方が高い塩分濃度になる場合や、高塩分/低塩分/高塩分とサンドイッチ状の水平分布になるなど、多様な様相を呈する。下流潟沼川におけるこのような塩分分布は合流点での那珂川の塩分濃度、界面高さに強く支配されている。

2) 潟沼への塩分供給は那珂川の流量が少ない冬期に活発になる。潮汐により流入する塩分量の累積値は潟沼内の塩分変化と相関が非常に高い。よって、潟沼の湖水交換には那珂川を通じた塩水の寄与が大きく、塩分供給量は那珂川の流量に強く支配されると結論できる。複雑な塩分動態をもつ下流潟沼川は、那珂川と潟沼の海水交換を非線形的に媒介するフィルターとなっている。

3) 潟沼湖口付近の浅瀬を作渚すれば、湖内の塩分濃度が増加するとともに、1潮汐間の流入・流出量や塩分の季節変動も拡大することが分かった。これは、作渚が湖水の水質浄化、汽水域の生態系復元の有力な手段になりうることを示す結果である。

謝辞: 国土交通省関東地方整備局常陸工事事務所、茨城県土木部河川課と茨城県大洗港湾事務所から観測データを提供して頂いた。また現地観測では、茨城県水戸土木事務所、大潟沼漁業協同組合に御協力を頂いた。この研究は、茨城大学と茨城県内水面水産試験場、独立行政法人水産総合研究センターの共同研究の一部であり、メンバーとの議論が有益であった。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 茨城県大洗港湾事務所 (2000): 大洗港波浪潮位データ整理解析報告書, 第七報, 資料2, pp. 25-36.
- 茨城県河川課 (1990-1999): 茨城県水位流量年表.
- 建設省河川局編 (1999): 流量年表平成10年, 建設省河川局編.
- 佐々木淳・磯部雅彦・渡辺晃・五明美智男 (1996): 東京湾における宵潮の発生規模に関する考察, 海岸論文集, 第43巻, pp. 1111-1115.
- 高橋亮一・棚町芳弘 (1991): 差分法, 計算力学とCAEシリーズ, 培風館, pp. 183-184.
- 塚田光博・三村信男・鈴木雅晴 (1997): 東京湾における貧酸素水塊の形成・停滞・消滅過程のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1086-1090.
- 柳 哲雄 (1989) 沿岸海洋学—海の中でのものはどう動くか—, 恒星社厚生閣, p. 113-116.