

涸沼川下流域における土砂・栄養塩動態の特性

SEDIMENT AND NUTRIENTS TRANSPORT IN THE HINUMA RIVER AND ESTUARY

横山勝英¹・諏訪義雄²・二村貴幸³・谷口 丞⁴・末次忠司⁵

Katsuhide YOKOYAMA, Yoshio SUWA, Takayuki FUTAMURA, Susumu TANIGUCHI and Tadashi SUETSUGI

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究室 研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

²正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究室 主任研究官 (同上)

³正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究室 研究官 (同上)

⁴正会員 工修 国土技術政策総合研究所 河川研究室 交流研究員 (同上) (日本建設コンサルタント)

⁵正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究室 室長 (同上)

Suspended sediment and nutrient transport were monitored during one year in two areas, one is the upper reach of a river which flow into Lake Hinuma, one is the estuary which is outlet of the lake. SS and particulate phosphorous (P-P) concentration can be estimated by turbidity using their correlation. The measurements of suspended load in the tidal channel were made using an acoustic Doppler current meter and turbidity meters. The amount of the sediment which is the difference between the sediment load monitored in the river and in the tidal channel during one year corresponds to the annual sedimentation rate in Lake Hinuma which was estimated by geological approach. The flux of P-P flow into the lake during floods reached 60% of the total phosphorous in one year. It is assumed that most of these P-P deposits in the lake and dissolved phosphorous released from P-P makes phytoplankton grow up.

Key Words: river system, sediment and nutrients management, turbidity monitoring, sedimentation rate, tidal current

1. はじめに

河川水系では流域で生産された土砂の輸送によって地形が形成されるが、近年、貯水池建設や砂利採取といった土砂の自然な流れを改変する人為作用と、河床低下や海岸侵食といった地形の急激な変化及びそれに伴う災害の関連性が指摘されており、水系における一貫した土砂管理が必要とされている。

また、河川や湖沼、特に感潮域や河口干潟、汽水性湖沼では漁業活動や底生生物による水質浄化が活発であり、生態系を保全してゆくことが重要である。こうした河川や湖沼の生態系は、地形の改変と栄養状態の変化に敏感に反応するため、土砂のみならず栄養塩等の物質を水系全体で管理することも必要であるといえる。

地形や生態系の変化はある程度長い時間(数年から数十年のオーダー)の中で生じるため、土砂や栄養塩の水系一貫管理技術を構築するためには、長期的な現地データに基づいて物質動態を把握する必要がある。

そこで本研究では、茨城県涸沼川の下流域(汽水湖で

ある涸沼の流入流出河川)において土砂と栄養塩の長期的なモニタリング観測を実施し、その観測手法の有効性を示すと共に、土砂及び栄養塩動態の特性を考察した。

2. 現地観測の概要

(1) 観測対象地の特徴

観測対象地は茨城県那珂川水系涸沼川である。図-1に流域概要図を示す。涸沼川は標高300~500mの低平山地に源を発し、流路延長65km、流域面積459km²である。河床材料は1~5mmの花崗岩質の砂礫(マサ)が主体となっている。流域の土地利用は森林が約49%、田畑が38%、集落が9%であり、また畜産業が盛んである。

涸沼川は下流の沖積平野において支川の涸沼前川が合流して涸沼に流入する。涸沼は湖面積が約9km²、最大水深3.1m、平均水深2.1mと浅く、また湖面標高は0mである。さらに、涸沼は約8kmの感潮河道を通じて那珂川河口に接続しており、日常的に塩水が遡上する汽水湖となっている。これら特徴のために、涸沼及び感潮河道で

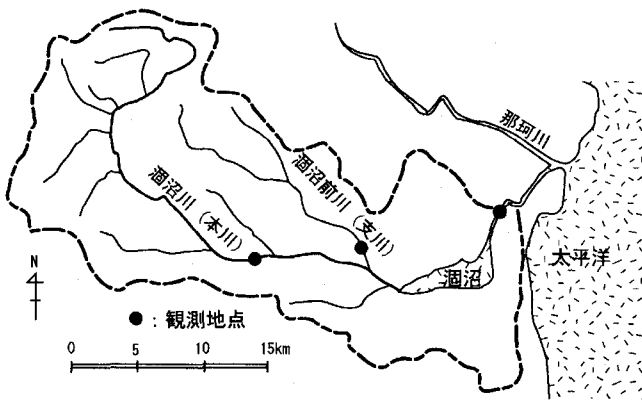


図-1 流域概要図及び観測地点

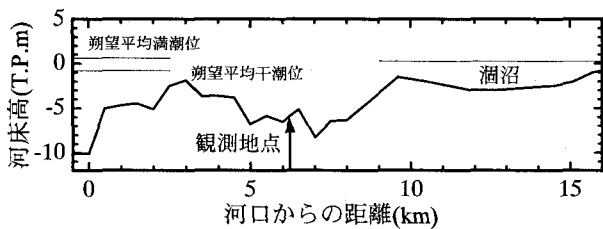


図-2 濁沼及び感潮河道の最深河床縦断面図

はシジミの生産量が年間約3,200トン(平成9年)と豊富で、矢道湖、利根川に次ぐ漁獲を誇っている¹⁾。濁沼は江戸期以降、低湿地の干拓や堤防整備などが実施されてきたが²⁾、日本各地の汽水域で戦後に実施された大規模干拓や河口堰建設といった事業は行われていない。そのため、シジミ生産量も昭和30年代と大差なく³⁾(乱獲による増減はあったが)、今なお自然が維持されている貴重な存在である。

(2) 観測方法

観測地点は図-1に示すとおりであり、濁沼川では土砂及び栄養塩移動量の観測を、濁沼下流の感潮河道では塩水流動とそれに伴う土砂及び栄養塩の動態観測を実施した。図-2に濁沼下流域について河床縦断面図を示す。

濁沼川には本川と支川の2ヶ所に濁度計と水位計を設置し、2000年7月より現在に至るまで20分間隔で連続モニタリングしている。水質の計測は洪水時と平常時にそれぞれ数回実施し、自動採水機もしくは直接採水により水を採取して、実験室でSS、リン、窒素、粒度分布を分析した。なお、濁度計は赤外光の後方散乱強度をカオリン標準液で検定し、濁度値として表示している。

また、流量の公的な観測データは無いため、独自に洪水流量観測を実施してH-Q式を作成し、水位より流量を求めた。本研究では年間の物質輸送量を検討するため、洪水時の大流量だけではなく低水流量についても精度が必要である。そのため、2つの河川について、流域面積比と年間累積流量の割合の整合性、流出率の整合性を検討して、低水流量を補正した。

感潮河道では河口より6kmの地点に超音波流速計と濁

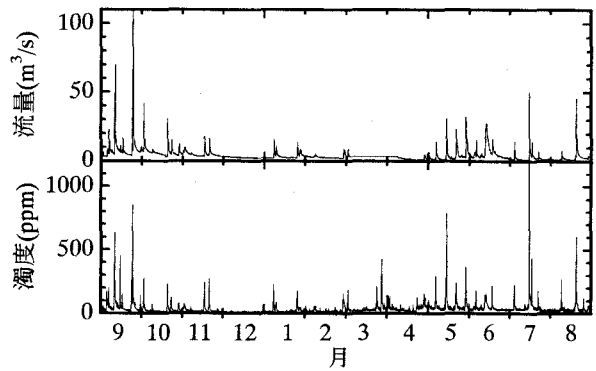


図-3 濁度モニタリング結果(2000年9月～2001年8月)

度計、塩分水温計を設置し、2000年9月から現在に至るまで30分間隔でモニタリングしている。超音波流速計は河床に設置して鉛直上方の流速分布を計測し、濁度計と塩分水温計は河床より1m、4m、7mの位置に係留した。水質計測の要領は上流河川と同様である。

本観測で用いた機器類は、濁度計(アレック電子製 ATU-8M)、水位計(ダイバー)、塩分水温計(アレック電子製 MDS-CT)、超音波流速計(RDI社製 ADCP1200 kHz)、自動採水機(ISCO6700)である。

3. 観測結果

(1) 濁沼川の物質輸送

図-3に濁沼川本川の濁度モニタリング結果を示す。1年間にわたってデータが連続的に取得できている。なお、過去11年間の平均年最大流量は134m³/sであり、一方図-3の期間の最大流量は125m³/sであるため、この年は概ね平均的な出水規模であったと言える。

図-4は平水時の水質時系列、図-5は洪水時の水質時系列の一例である。溶存態リンは流量によらずほぼ一定であるが、全リンは平水時に低く洪水時に高くなる。また、溶存態リンの濃度は全リンに比べて比較的低い。特に洪水時はほとんど懸濁質になるため、年間総負荷量の大半を懸濁態が占めると推測される。

一方、全窒素は平水時と洪水時の濃度変化が全リンほど大きくない。また、溶存態無機窒素の全窒素に占める割合が平常時は約8割、洪水時でも3～5割に達する。本研究では溶存態有機窒素を分析していないため、その濃度は不明であるが、溶存態有機窒素を考慮すると全窒素に占める溶存態の比率は更に高くなると考えられる。したがって、窒素の年間負荷量は平水時の溶存態の占める割合が高いと推測される。

既往の研究によれば、リンは土砂に吸着して輸送されるため、懸濁態リンとSSの相関は高いが、窒素に関してはあまり相関が高くないと言われている⁴⁾。したがって、懸濁土砂のモニタリングによって同時に推定できる項目は懸濁態リンとなり、また、懸濁態リンは年間総負荷量に占める割合も高いであろうから意味のある結果が

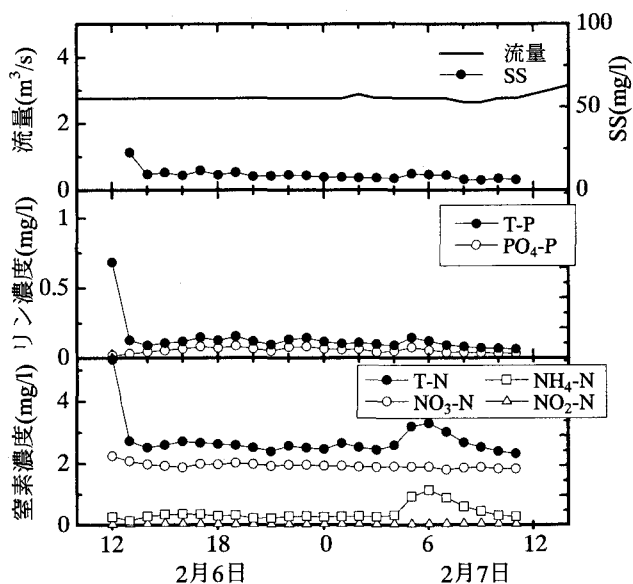


図-4 平水時の水質時系列の一例 (2001年2月6日)

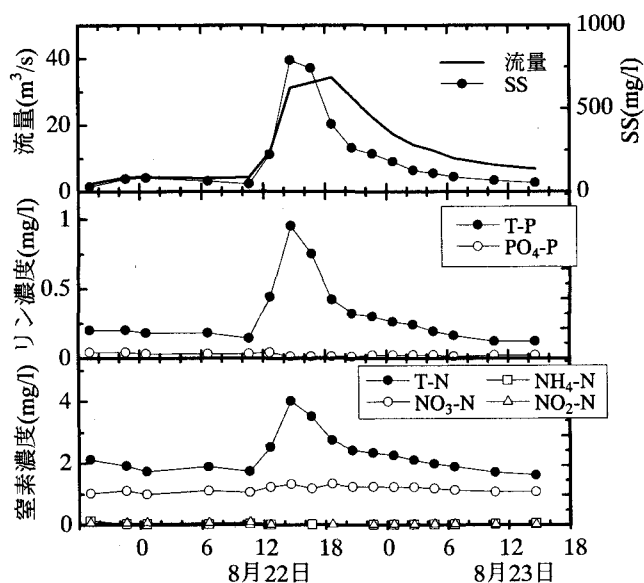


図-5 洪水時の水質時系列の一例 (2001年8月22日)

得られると考えられる。

そこで、土砂とリンの関係を整理し、濁度とSSの相関(図-6)、SSと懸濁態リンの相関(図-7)を得た。いずれも高い相関が認められることから、濁度モニタリングより懸濁土砂及び懸濁態リンの輸送状態を常に把握できることが確認された。最近の濁度計は非常に小型で現地での設置が容易な上に、メモリーやワイパーを備えて高機能であるために、手軽に物質動態を把握できる。

窒素については、年間を通して溶存態濃度を直接モニタリングする必要があると考えられる。

(2) 感潮河道の物質輸送

a) 流れの特徴

瀬沼下流の感潮河道における平常時の流れの典型例を図-8に示す。流速・塩分・濁度のいずれもほぼ全層一

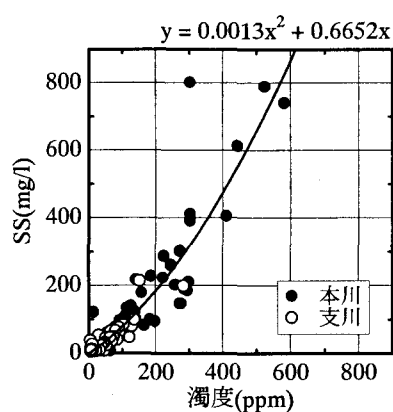


図-6 濁度とSSの相関

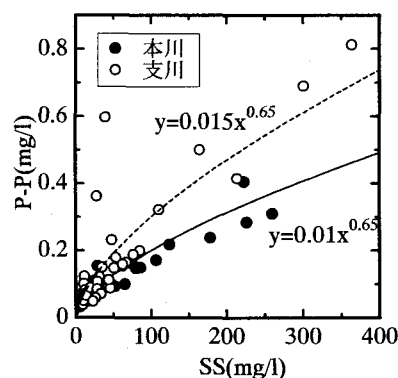


図-7 SSと粒子態リンの相関図

様となっているが、上げ潮や下げ潮によって流れが逆転する際にわずかに勾配が生ずる。他の感潮河道(多摩川、白川)で観測された高濁度水塊は、ここでは1年を通じてほとんど確認されなかった。その原因については現時点では不明である。

なお、参考までに河口で合流している那珂川の8km地点での観測結果を示すが(図-9)、那珂川では塩水楔が形成されて塩淡水二層状態となっている。両者に違いが生ずる要因は次のように推測される。

那珂川の河床縦断形状は平坦であるが、瀬沼下流域は河口から3kmの地点に浅いマウンドがあり、ここで混合が促進される可能性がある。次に、感潮河道の上流端には瀬沼(湖面標高0m)が存在し、その容積は感潮河道の約10倍ある。そのため、塩水の遡上・後退による水位変動が瀬沼で緩衝されて海面と湖面の相対水位差が大きくなり、流れが大きな流速になる可能性がある。平均流速は約±0.4m/sであり、水塊は6時間で約8.5km移動する。これは、海水(もしくは湖水)が河口と瀬沼の間を一潮汐で往復している計算となり、強混合的な速い流れを生み出す要因となっていると考えられる。

b) 土砂の通過状況

上流からの物質の伝搬をみるために、図-10に瀬沼川と感潮河道における1ヶ月間の濁度の時系列を示す。河川では7月18日に平均年最大流量の約半分の規模の洪

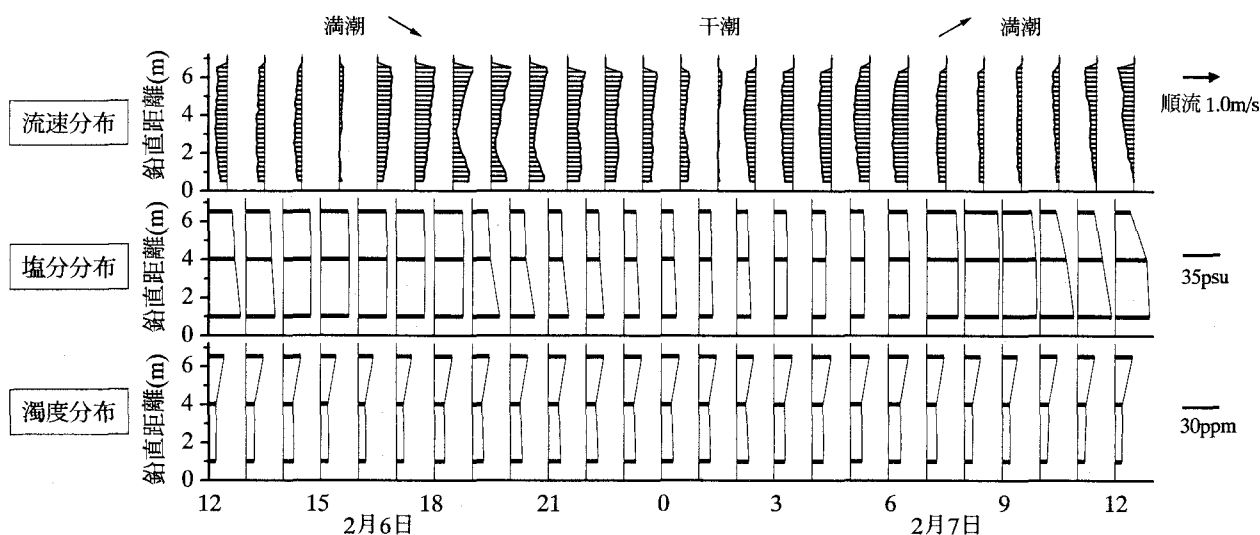


図-8 湊沼下流の感潮河道における平常時の流況（流速分布・塩分分布・濁度分布の24時間時系列，大潮）

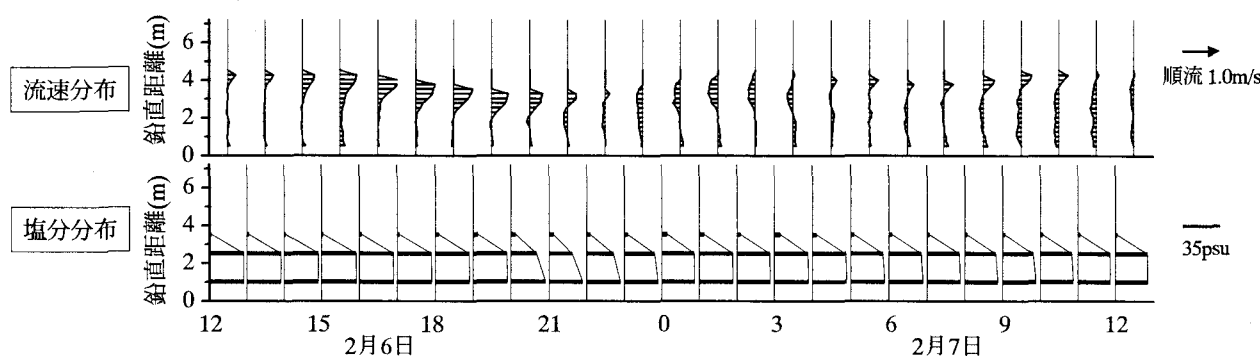


図-9 那珂川の感潮区間における平常時の流況（流速分布・塩分分布の24時間時系列，大潮）

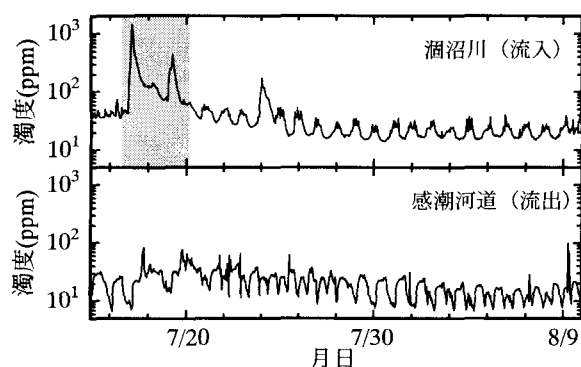


図-10 湊沼川と感潮河道の土砂通過状況の比較（2001年）

水が発生して濁度が上昇したが、感潮河道ではほとんど濁度の上昇がみられない。この洪水で発生した河川水の総量は340万 m^3 であり、一方湊沼の容積は1,900万 m^3 であるため、湖水を全て入れ替える規模ではない。そのため、湊沼で一旦滞留する間に希釈や沈殿によって流出水の土砂濃度が低下したと考えられる。

以上示したように、感潮河道の土砂の動態を連続モニタリングするには、超音波流速計の河床設置と濁度計・塩分水温計の係留が有効である。なお、著者らは別報で超音波流速計の反射強度を用いた土砂濃度の推定方法を

提案しているが、本研究で用いた超音波流速計（ブロードバンドタイプ）は土砂濃度への応答が悪いため、このような場合は濁度計を併用する必要がある。

c) 栄養塩の挙動の特徴

潮汐流に伴う栄養塩の変化は図-11のようであった。観測は先ほど示した上流河川での平常時観測（図-4）と同時に実施された。検水は中層から採取したが、前述の通り全層一様な流れであるため、中層のデータで代表され则认为てよい。

SSと硝酸性窒素は海水遡上時（塩分上昇時）に濃度が低下することから、これらの濃度は湖水の方が海水よりも高いことが分かる。一方、リンの濃度は、全リンはほぼ一定であるが、溶存態は塩分濃度が下降し湊沼の湖水が流下している間はほとんど検出できなくなる。

上流河川の水質と比較するために、図-12に茨城県が取得した月一回の定期水質検査のデータを示す。平常時の湊沼における滞留時間は50日程度なので、同じ観測日のデータを単純に比較することは出来ないからである。これによれば、観測日から3ヶ月前までの間、リン・窒素ともにあまり変化はなく、著者らが取得したデータ（図-4）とも同程度の値である。

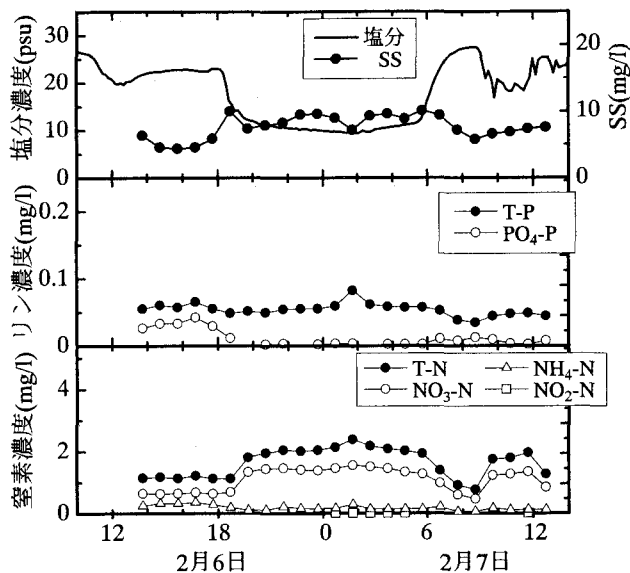


図-11 感潮河道における水質時系列

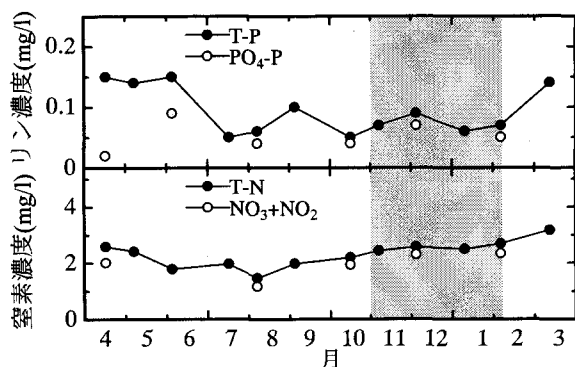


図-12 上流河川の1年間の水質変動(2000.4～2001.3)

つまり、上流の溶存態リン濃度(mg/l)は約0.05、硝酸性窒素の濃度(mg/l)は約2.0であるが、涸沼の流出水はそれぞれ0.002と1.5となっており、冬季にもかかわらず溶存態リンが涸沼内部でほとんど消費されている様子がうかがえる。ただし、涸沼内部の水質・底質や生物活動(特にシジミ)に関する情報が得られていないため、この結果については今後さらに検討する必要がある。

4. 土砂及び栄養塩の収支

(1) 土砂輸送量と湖底堆積量

上流河道では濁度のモニタリングにより懸濁土砂とリンの輸送状態を、感潮河道では流速鉛直分布と濁度のモニタリングにより懸濁土砂の輸送状態をそれぞれ把握できるので、ここでは長期的な輸送量の検討を行う。

計算対象期間は図-3に示した2000年9月1日から2001年8月31日までの1年間である。3章1節で述べたとおり、この年は平均的な出水規模の年である。涸沼川(本川・支川)から涸沼に流入する懸濁土砂量は、濁度観測値をSSに換算して流量と乗じることで求めた。涸沼から河口に流出する懸濁土砂量は、3水深の濁度観測値を

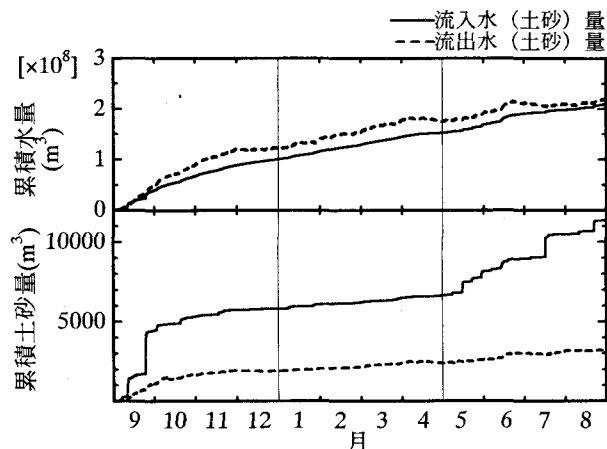


図-13 涸沼の年間流入・流出土砂量(2000.9～2001.8)

表-1 湖沼の土砂堆積速度

種別	名称	堆積速度 (mm/year)	分析方法
	涸沼	1	堆積厚の地質学的判断 ²⁾
汽水湖	浜名湖	3	C14法,地震履歴 ⁷⁾
	中海	2.5	C14法,火山灰 ⁸⁾
	穴道湖	1.25～7.5	硫黄濃度分析 ⁹⁾
ダム湖	東北地方12 ダム平均	1,550	年間堆砂量 ¹⁰⁾

SSに換算して、また流速の鉛直分布データから上中下3断面の通過水量を求め、両者を乗じて求めた。ただし、流速の計測は河央で実施しており、横断面内で見れば最強流速を計測しているため、平均流速は観測値の8割と仮定した。

なお、既往の調査によれば、涸沼湖盆の堆積物はシルト・粘土であり、比重は2.55～2.65、含水比は100～300%とのことである。したがって、流入河川と流出河川でそれぞれ濁度計により計測した懸濁土砂の差が涸沼の湖盆に堆積していると考えてよい。また、上記含水比より土砂の密度は1.26とした。

計算結果を図-13に示す。流入水の流量と濁度時系列は図-3を参照されたい。まず、流入水量を比較すると、両者はほぼ一致しており、上流での流量観測と感潮河道での流速分布観測が整合していると言える。

次に、流入土砂量を比較すると、涸沼に流入する懸濁土砂は洪水イベントごとに累積されてゆくのにに対し、流出する懸濁土砂は洪水の影響をあまり受けている様子もなく徐々に出てゆく様子が分かる。したがって、流入する土砂の大半は涸沼で滞留する間に堆積して行くと言える。流入土砂量と流出土砂量の差は1年間で約8,150m³となり、これを湖盆の面積で割ると堆積厚さは1.02mmとなった。湖盆の底泥調査より地質学的に推定された堆積速度(表-1)は1mm/yearであるから、流出入量の算定は妥当な結果が得られていると言えよう。

表-2 年間のリン輸送量の内訳 (単位: 10³kg)

	洪水時	平水時	年間総量
粒子態	22.7	5.8	28.5
懸濁態	5.6	4.8	10.4
全リン	28.3	10.6	38.9

なお、浜名湖や中海・宍道湖といった汽水湖でも1～8mm/year程度の値となっており、河川上流域のダム湖に比べて非常にゆっくりと堆積していることが分かる。

（2）リンの輸送量

河川におけるリンの年間輸送量は次のようにして求めた。懸濁態リンは図-6と図-7に示す相関式を用いて濁度から濃度を計算し、その後に流量を乗じて積分した。また、溶存態リンは流量と濃度の間に明確な相関が見られないことから、図-12より年平均濃度を求めて一律に流量に乗じて積分することで総重量を求めた。

洪水時と平常時に分けて1年間の輸送量を積分した結果、表-2が得られた。これより、年間のリンの総輸送量に占める洪水時の懸濁態リンの占める割合が6割に達しており、高い比重を占めることが分かる。

図-13によれば、平常時の土砂は流出量が平衡しており見かけ上潟沼を通過しているが、洪水時の土砂はほとんどが潟沼に堆積していることになる。懸濁態リンについても、その濃度は土砂濃度と相関が高いため洪水時のものは大半が潟沼に堆積していることになる。

3章2-c節で述べたとおり、潟沼では植物プランクトンの活性が低い冬季にも溶存態リンが欠乏している可能性がある。潟沼で大量に生産されるシジミは膨大な量の植物プランクトンを捕食して成長していると言われている。そのため、シジミの繁殖が活発な春から秋の時期には、堆積土砂からのリンの溶出が植物プランクトンの増殖を支えている可能性がある。

5. 結論

本研究では、土砂及び栄養塩の水系一貫管理技術を構築する基礎的段階として、茨城県潟沼川下流域を対象に懸濁土砂及び栄養塩の長期連続観測を実施し、観測技術の有効性について検討すると共に、土砂・栄養塩動態の特徴を考察した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 濁度とSS、SSと懸濁態リンには一価の関係がある。
- 2) 濁度の連続観測により、河道を浮遊して移動するSS及び懸濁態リンの濃度を精度よく把握できる。
- 3) 感潮河道では超音波流速計を河床に設置することで、潮汐による塩水の遡上後退運動を精度よく把握できる。
- 4) 潟沼の感潮河道ではほぼ全層一様の状態で海水と湖水が往復運動をしている。河口が同一の那珂川では塩淡水

二層状態が形成されていることと対照的である。この原因として、感潮河道出口のマウンドの存在、潟沼による水位変動の緩衝作用などにより、強混合状態が作り出されているのではないかと推測された。

- 5) 1年間に潟沼に流入及び流出する懸濁土砂量を計算したところ、流入量が11,380m³、流出量が3,230m³となった。両者の差から求まる土砂の堆積速度は1.02mm/年となり、堆積底泥調査から推測された値と一致した。
- 6) 潟沼に1年間に流入するリン量を計算し、洪水時の懸濁態リンが全体の6割を占めることが分かった。これらの大半は湖底に堆積するものと推測された。生物の活性が低い冬季においても流出水の溶存態リンは欠乏状態であったため、シジミが繁殖する春から秋の時期には、堆積底泥からのリンの溶出により植物プランクトンの増殖が支えられている可能性がある。
- 7) 以上より、本研究で提案した観測手法は水系における懸濁土砂及び栄養塩の把握に有用であると言える。

謝辞: 潟沼川感潮域における現地調査は国土交通省常陸工事事務所に実施していただいた。また、潟沼川上流域の現地観測は独立行政法人土木研究所の平舘治氏（元・河川研究室所属）が確立した観測システムによって実施された。潟沼川の定期水質データは茨城県生活環境部から提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 中村幹雄編著：日本のシジミ漁業，たたら書房，pp.113-127，2000

2) 阿須間幸男・堀江美紀・石井亮・三浦敬吾・大嶋和雄：茨城県潟沼の環境資源，茨城大学地域総合研究所年報，No.31，pp.1-21，1998

3) 佐藤敦久編著：水環境工学，技報堂出版，pp.107-109，1987

4) 横山勝英・宇野誠高：河川感潮域における高濁度水塊の挙動－強混合河川の場合－，海岸工学論文集，第48巻，pp.631-635，2001

5) 横山勝英・藤田光一：多摩川感潮域の土砂動態に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp.937-942，2001

6) 横山勝英・宇野誠高：第7会河口研究集会概要集，pp.1-4，2001

7) 森田英之・鹿島薫・高安克己：湖底堆積物中の珪藻遺骸群集から復元された浜名湖・宍道湖の過去10,000年間の古環境変遷，汽水域研究，No.5，pp.47-53，1998

8) 三瓶良和・松本英二：汽水域における完新世の古環境解析－中海堆積物を例として－，平成5年度名古屋大学大気水圏科学研究所共同研究報告書，pp.77-86，1994

9) 田村嘉之・丹後雅憲・井内美郎・徳岡隆夫：宍道湖における17世紀初頭の汽水から淡水への環境変化－コアのCT画像解析と堆積，C-N-S元素分析による検討－，汽水域研究，No.3，pp.49-56，1996

10) 建設省東北地方建設局：東北地方ダム管理フォローアップ委員会資料，1997

(2001. 10. 1受付)