

十三湖におけるシルト・粘土の捕捉に着目した 土砂動態の実態把握

GRASP OF SEDIMENT MOVEMENT FOCUSING ON CAPUTURING FUNCTION
OF FINE SEDIMENT IN LAKE JUSAN

望月 貴文¹・天野 邦彦²・藤田 光一³

Takafumi MOCHIZUKI, Kunihiko AMANO and Koichi FUJITA

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室
³正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部

To clarify the mechanism of the physical environment of Lake Jusan, which is one of brackish lakes in Japan, we focused on movement of fine sediment, and performed field measurements. We measured sediment concentration and turbidity from 2007.6, to measure the sediment transport that flow in or flow out from Lake Jusan, and calculated sediment budget. We also collected and analyzed the bottom sediment. The results indicated that fine sediments supplied from the upper reaches are caught in Lake Jusan at certain ratio, and this system is influenced by frequency and scale of flood and bottom sediments resuspension caused by wind waves.

Key Words : Lake Jusan, brackish lake, sediment movement, fine sediment, sediment budget

1. はじめに

河口汽水域は、洪水・強風による乱れなどの自然攪乱、及び河川改修や水利用、汚濁負荷流入などの人為的攪乱の影響を強く受け、かつ汽水域特有の生態系を形成する。そのため、今後の気候変動・河川改修等に伴う流動・土砂・物質循環等の変化に対する環境変動予測手法について、様々な側面から検討する必要がある。特に細粒土砂は、貧酸素化の原因物質であるため、汽水湖における一連の底泥の動態と質の変化は、その水環境、生物生息場に大きく影響する要因の一つである。湖沼における細粒土砂の動態をとらえるための研究としては、その実態を捉えるための懸濁物質や底質の現地観測が、例えば諏訪湖¹⁾、涸沼²⁾等で行われている。また、湖沼における細粒土砂の動態を左右する現象として、「底泥の巻き上げ」に着目し、その実態を掴むための研究が行われている(例えば海田ら³⁾)。細粒土砂の堆積・侵食状況に着目した研究としては、山崎ら⁴⁾は、手賀沼に流入する都市河川大堀川河口を対象に、降雨時、非降雨時条件下での河口域におけるSS収支を調べている。しかし、細粒土砂の出水時・平水時を通した汽水湖での捕捉状況を捉えようとしている事例は少ない。

本研究では、河口汽水域の代表事例として十三湖を取り上げ、シルト・粘土の定量的収支を把握することを目的として、十三湖内でのシルト・粘土の捕捉機能に着目し、濁度と底質の現地観測を実施し、十三湖におけるシルト・粘土の動態について考察した。

2. 十三湖の底質及び地形特性と本研究の狙い

十三湖は、岩木川の最下流部に位置する汽水湖であり、湖面積18.6km²、水面標高0m、湖心部における最大水深が約2mと浅く、容積約1,600万m³と、岩木川の流域面積2,540km²を考慮すると、他の河口湖と比較して流域面積に対して容積が小さいことから、平常時の河川流入水の湖滞留時間は約1日と短い⁵⁾。日本海とは水戸口と称する幅約165m、水深約3.5m、延長約800mの水路で接続され、この水戸口を経由して流入出する海水・湖水・河川水は、湖内の汽水環境を左右する⁶⁾。

また、十三湖ではヤマトシジミが重要な漁業資源となっており、年間約2000tの漁獲を誇る。ヤマトシジミの生息に影響を及ぼす重要な環境要因としては、水温、餌となる有機物の質と供給量、底質等があげられる⁸⁾。

餌となる有機物の供給に関する研究として、石田ら⁹⁾

は、岩木川における水質調査の結果を解析し、五所川原地点におけるCODは、春季に最小値、夏季に最大値を示す傾向がみられ、常に2mg以上を示していること、夏季はシジミの成長及び産卵期であり、多量の有機物を摂食する必要があるが、夏季に豊富な餌が供給されていることを示している。また、Kasai et al⁹⁾は、十三湖のシジミは水戸口付近では海起源の有機物を、上流部では河川起源の有機物を餌としていることを示している。底質に関しては、シジミの生息適性条件として、シルト・粘土含有率が低い（10%以下）砂質であることが重要であるとされている⁸⁾。青森県内水面水産試験場の調査成果によるシジミの分布¹⁰⁾によれば、砂が主成分となっている底質の場所で生息密度が高くなる傾向が見られる。

以上からわかるように、十三湖では、シジミに代表される底生動物とそれを取り巻く生態系を考える上で、湖底の物理環境が重要な要素となっている。

図-1に、岩木川の距離標20k付近から十三湖にかけての河床及び湖底質材料の粒径分布を示す。河床及び湖底の主材料は、3つの集団に明確に分かれる。1つめは、シルト・粘土の集団であり、十三湖に分布する。2つ目は、砂の集団であり、十三湖と岩木川に分布する。以下、それぞれ「泥集団」「砂集団」と呼ぶ。なお、水戸口（図-2参照）には3つ目の集団である砂～礫が分布している。

図-2に岩木川平均河床縦断面図（岩木川から十三湖への流入口が縦断距離0km）及び河床・湖底質材料の縦断分布特性を、図-3に十三湖及び岩木川の平面図を示す。図-2中に示す矢印は、流域からの土砂供給量・各地点の通過土砂量・事業履歴・地形変化による土砂移動等を考慮した土砂動態分析から推定される砂及び泥集団の挙動である。山地より供給された泥集団は、河岸・高水敷や最下流セグメントの河床に一部堆積するものがあるが、その多くが十三湖まで「通過型」として運ばれると考えられる。砂集団については、45km付近より下流のセグメントにおいては、「混合型」として河床材料となって流送されることが考えられる。

図-4は、十三湖の底質の主成分の平面分布と、平成12年度の深浅測量成果¹²⁾より作成した深浅図を重ねたものである。砂（0.1～2mm）が主成分となっているのは、岩木川の流入部、相内川の流入部の標高が-0.1mより浅い地点及び水戸口付近に集中している。また、平井ら¹³⁾による海跡湖の地形分類と比較すると、砂が主成分となっている材料は岩木川流入部で三角州が形成され、三角州頂置部又は前置斜面と定義される地点、及び相内川流入部で湖棚と定義される地点付近に多く分布している。一方、泥集団は、それ以外の比較的深い地点に分布する。これらのことは、湖底質の分布特性が、湖の地形形成過程と現在なお密接な関係を持つことを示し、興味深い。

海津¹⁴⁾によると、縄文時代前期（約6000年前）の縄文海進の頃には、五所川原付近まで海水域が入り込んでおり、その後海水面の低下と岩木川からの土砂供給に伴い

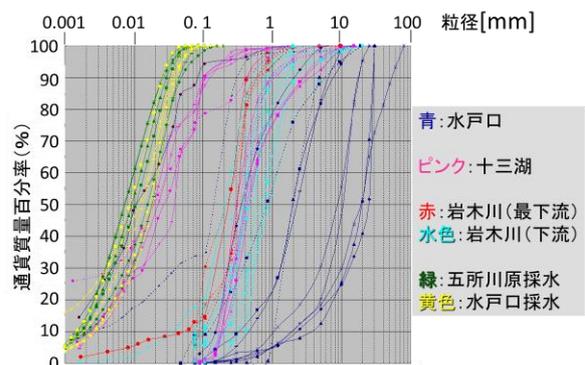


図-1 岩木川及び十三湖の河床・湖底材料粒径分布
昭和43年、昭和60年、平成13年河床材料調査成果¹¹⁾より作成

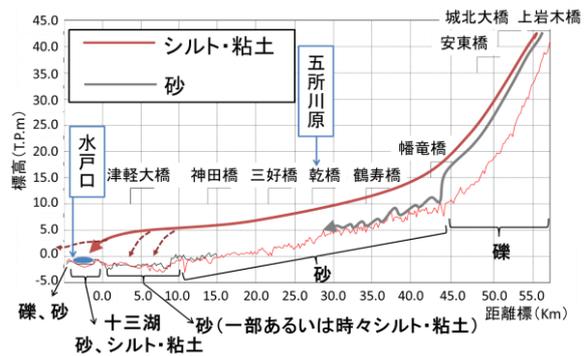


図-2 岩木川縦断面図と粒径集団別の土砂動態
昭和40年、平成13年定期横断測量¹⁰⁾
昭和43年、昭和60年、平成13年河床材料調査成果¹¹⁾より作成

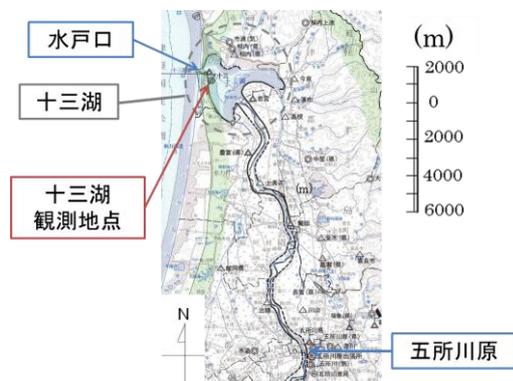


図-3 十三湖及び岩木川流域平面図

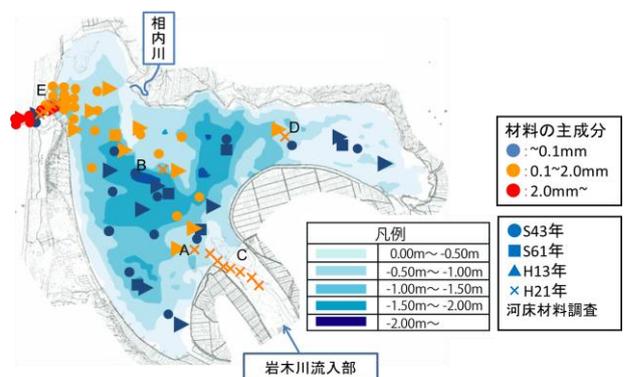


図-4 平成12年深浅図と河床材料
昭和43年、昭和60年、平成13年河床材料調査成果¹¹⁾より作成

現在の十三湖が形成されたとされている。村山ら¹⁵⁾がボーリング資料を用いて作成した津軽平野の沖積層地質断面図によると、岩木川デルタの構成層には、貝殻を含む厚いシルト・粘土の層がみられ、上流へのくさび構造を示し、それが五所川原付近まで続いていることから、縄文海進は五所川原まで及んだと指摘している。このことから、1万年前からの長期スケールでは泥が支配的な湖底であり、岩木川からの土砂堆積による湖の縮小と、砂デルタ（前置層）の進出により、現在のような砂が支配的で、泥が混じる状況になったと考えられる。以上より、今後の十三湖の物理環境を考える上では、①砂デルタの進出、②泥の溜まり方の2つが重要な要素になる。このうち前者に関わる砂集団の岩木川から十三湖への供給については、昭和20年代以降、特に昭和50年代に重点的に行われてきた河川改修等により、流下能力上の課題があった岩木川の最下流セグメントを中心に河積の拡大が図られ、当面、砂集団の十三湖への供給が小さい状態が続くと考えられる。よって、十三湖では、実態が未解明な泥集団の動態を捉えることが技術的にはまず重要であると考え、その動態について検討した。

3. 観測・調査の方法

(1) 流送される泥集団の濃度・濁度の観測

十三湖における泥の堆積・通過の様子を把握するために、十三湖への流入土砂量及び十三湖からの流出土砂量の算定を試みた。ここで、十三湖における収支を分析するためのコントロールボリュームとして、五所川原地点から十三湖全域を設定し、そこへの流入条件として五所川原地点、流出条件としては水戸口地点を選定した（図-2、3参照）。ここで、十三湖流入口を流入条件にとらなかつたのは、五所川原地点では河床勾配が大きいこと、流速が大きく、平常流量(約50m³/s)時でも摩擦速度は約0.06m/s程度あり、泥集団として粒径0.03mmの粒子の沈降速度(ストークスの式¹⁶⁾より約0.08m/s)を考慮すると、ラウス式による濃度分布¹⁷⁾より、濃度が断面内で一様に近い状況となり、泥集団がウォッシュロード的挙動を示すことが推察され、土砂輸送量の見積もりが容易となるためである。水戸口についても流速が大きいこと、同様のことが言える。

出水時の泥集団の濃度を把握するため、自動採水器（Model6700；ISCO（株））を用いて河川水を採取した。また、濁度計（ATU3W-CMP；アレック電子(株)）を設置することにより、平常時を含めた濁度の連続観測を行った。計測地点の詳細を図-5に示す。本研究では計5出水について採水を行った。その状況を表-1に示す。平成19年9月18日の出水が最も大きく、五所川原における流量は平均年最大流量とほぼ同じである。

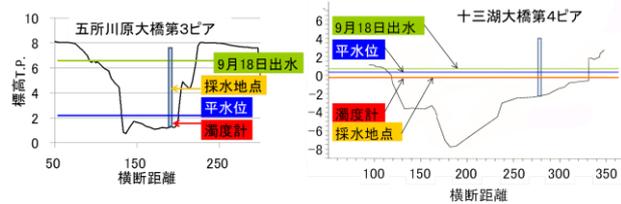


図-5 採水・濁度計測地点

表-1 採水状況

日時	五所川原 最大流量 (m ³ /s)	五所川原 採水	水戸口 採水	濁度計 (五所川原、 水戸口)
H19(2007)/9/8	100	○(3)*	○(48)	○
H19(2007)/9/18	820	○(26)	○(48)	○
H20(2008)/8/3	270	○(3)	○(24)	○
H20(2008)/8/14	490	×	×	○
H21(2009)/3/14	430	○(10)	○(12)	○

(2) 湖底状況スポット調査

湖底質の継続的な把握を目的として、図-4に示すA~Eの各地点において、底質を採取し、粒度分析を行った。A,B,D地点では、基準地点から南東、南西、北東、北西の4方向に1m間隔で3地点ずつ、各地点で13地点、C地点では岩木川から十三湖流入口にかけて10m間隔で14地点、E地点では1m間隔5地点で採取を行った。採取は平成21年1月、3月、9月、平成22年3月の4回である。但し、D,E地点は平成21年9月から追加した調査地点である。採取はアクリルパイプ性(φ10cm)の採泥器またはバケット式の採泥器(22×22cm)を用いて行った。採取した土砂の表層1cmを対象とし、粒度分析を実施した。

4. 観測・調査の結果と分析

(1) 流送される泥集団の濃度・濁度

a) 土砂濃度と濁度の関係

図-6に自動採水器で計測した土砂濃度と、同時刻に計測した濁度を比較した結果を示す。図中の実線と数式は、浮遊砂濃度と濁度の一次近似直線及び近似式である。本研究では、濁度を土砂濃度に換算するために図中の近似式を用いて、平常時や欠測期間など直接土砂濃度を計っていない期間について、濁度計の連続観測結果より、土砂濃度を推計した。

なお、出水時の採取した土砂の粒度分布は、図-1に示したうちの泥集団の粒度分布にほぼ一致していた。

b) 出水時の特性

平成19年9月の流量及び濁度の計測結果を図-7に示す。水戸口における流量は、以下の方法により算定した。十三湖への流入量と十三湖水位の時間変化から求めた水量の収支から、以下に示す式(1)により算定した。

$$Q_{out} = Q_{in} - \frac{\Delta H / A}{\Delta T} \quad (1)$$

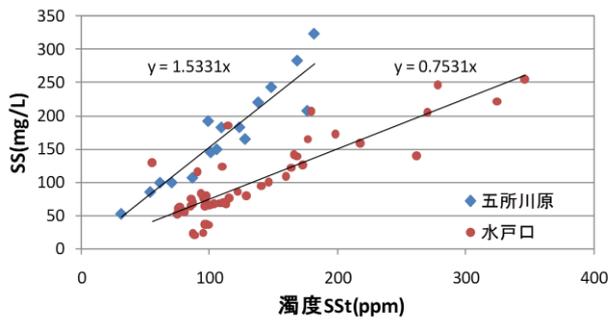


図-6 濁度計の濁度と自動採水器の浮遊砂濃度の関係

Q_{out} : 十三湖流出口流量 (水戸口) , Q_{in} : 十三湖流入口流量 (岩木川0km地点) , H : 十三湖水位, A : 十三湖面積である。ここで, Q_{in} (十三湖流入口流量) は, 五所川原における流量実測値を用い, Kleitz-Seddonの法則¹⁸⁾より長方形断面における洪水の伝搬速度を算定し, 平成19年9月18日出水時において, 五所川原から十三湖流入口まで約6時間の伝搬時間があるとして求めた。他の出水についても, この6時間前の時差を仮定した。9月18日の出水では, 流量の増加に対応した濁度の増加が, 出水の立ち上がり時, 流量のピーク時の2回に渡り発生している。これは, 1回目のピークは, 出水の立ち上がりの流速増加の影響を受け, 湖底の堆積土砂が巻き上がったことによる濁度の増加, 2回目のピークは, 出水により岩木川から運ばれる土砂の影響による濁度の増加であると推察される。一方, 9月8日の出水では, 水戸口では対応した明確な濁度の上昇は見られなかった。これは, この規模の出水においては, 五所川原を通過した土砂は十三湖に捕捉され, 出水の影響による土砂の通過はほとんどなかったためと考えられる。水戸口の濁度データについて, 出水に関係なく高い値を取ることが散見された。この時, 数時間に渡り連続して高濁度が計測されており, 風波等に起因する濁度の上昇であると考えられるが, この現象については後ほど詳述する。なお, 9月18日 0:00~9月30日 24:00のデータは濁度計が埋まってしまったことにより欠測となったため, その他の出水時における流量・濁度の相関関係から, この期間の濁度を推測し, 補間した。

c) 平常時の特性

出水時との比較のため, 平常時について変化の様子を分析した。ここでは, 11月の流量, 濁度, 土砂量及び風速を比較したものを図-7に示す。風速は国土交通省による十三観測地点 (図-3) における定期観測データを使用した。図-8中の点線の範囲を見てみると, 強い風速が1~3時間程度前に生じた条件においては, 水戸口流量が正 (海に出る方向) のときに水戸口濁度が大きくなる様子が見られた。このような傾向は, 年間を通して風速が大きくなる冬季に明瞭に見られた。

d) 水戸口における濁度と流量の関係

水戸口における濁度及び流量の年間を通した散布図を

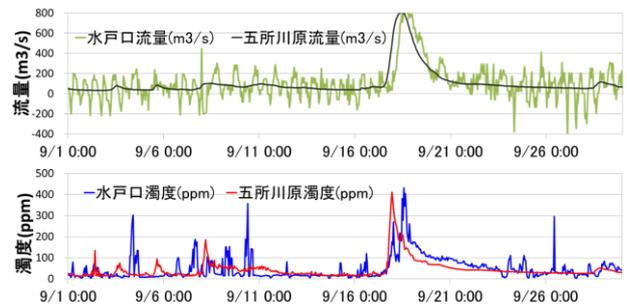


図-7 H19/9出水観測結果 上: 流量 下: 濁度

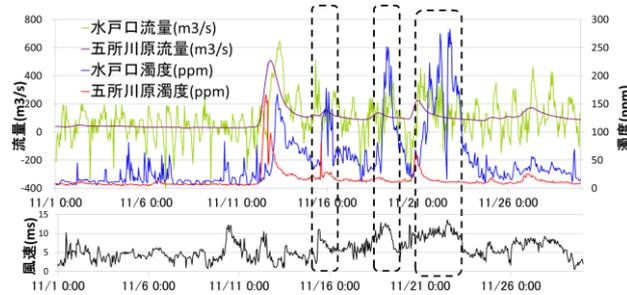


図-8 連続観測結果 上: 流量・濁度 下: 風速

図-9に示す。風速が5m/s以上の時 (赤色) , 5m/s未満の時 (緑色) に色分けしている。なお, 風速5m/sは十三観測地点での平成19年6月から平成20年6月の期間における平均値である。この分布を見ると, 図中点線で示す①~③の3つの集団に分けられることが分かる。この各集団の成立要件について, 以下のように考察できる。
①流量, 濁度ともに大きい集団であり, 出水時。
②流量, 濁度ともに小さい集団であり, 平常時。
③流量は小さいが濁度は大きい集団である。水戸口の流量は, よく見るとわかるように大部分が正であり, また, 赤色のプロットが多い。風波が強い時期の細粒分の巻き上がりが潮汐により海へ抜け出ていると考えられる。なお, グラフ表記の都合上, 赤色の上に緑色が重なっており, ②の範囲には, 赤色のプロットも多数存在している。

(2) 泥集団の収支の分析

a) 出水時

泥集団の定量的収支の把握として, 土砂濃度と流量の積から十三湖への流入土砂量, 十三湖からの流出土砂量 (水戸口での流入出量) を算定した。図-10に平成19年9月18日出水期間における流入・流出土砂量の変化を示す。出水の立ち上がり時に十三湖に流入した土砂が, 十三湖内を移動し, 水戸口より流出している様子がうかがえる。

算定した平成19年9月18日の出水期間における流入量, 流出量を積分し, 期間中の累計流入・流出土砂量及びその差 (蓄積土砂量) を算定したものを図-11に示す。また, 蓄積土砂量/流入土砂量×100(%)を捕捉率と定義し, 同様の方法で, 他の出水についても捕捉率を算定した結果を図-12に示す。この結果より, 出水時に限定した捕捉率については, 図-12中の点線で示すように, 大きな出水であるほど小さくなるというように, 出水規模に

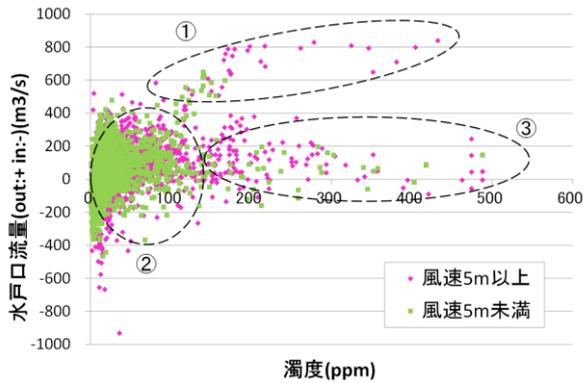


図-9 濁度と流量の関係（水戸口）

よって決まっていることが推測される。

b) 平常時と出水時を合わせた全体状況

観測期間のうち平常時を含む平成19年6月20日～平成20年6月20日の一年間を対象とした土砂量の算定結果を図-13に示す。期間を通じては総流入量約11万トン、総流出量約6万5千トン、総蓄積量約4万5千トンである。この量は、十三湖に一樣に堆積すると仮定すると、期間を通じて約1mmの湖底上昇に相当する。

平成19年9月18日の出水により大量の土砂が蓄積しており、年間を通じた蓄積量には出水のインパクトが非常に大きいことが示唆された。（図-13中①の範囲）また、春～夏季は蓄積する一方なのに対し、冬季には蓄積量はほぼ横ばいか、逆に減っている様子が見られる。（図-13中②の範囲）

月ごとの流入量、流出量及び捕捉率の変化を図-14に示す。春季～夏季（3月～10月）には捕捉率が高く蓄積傾向、冬季（11月～2月）は捕捉率が低く、平衡又は流出傾向にあることが分かった。年間を通じた捕捉率は41%であった。

捕捉率に影響を与える水戸口からの土砂の流出に着目すると、出水が一つの大きなインパクトであるが、平常時にも発生している。平常時の流出は、(2)c)d)で見た実測結果において高濁度が計測された、強い風波が発生し、潮汐の変化のうち、水戸口流量が海に出るときに発生していることから、風波によって巻き上げられた底質が、潮汐によって流出することが要因であると推定される。

以上から、十三湖はシルト・粘土を捕捉する機能を有しており、その捕捉の程度には、出水時にはその規模が、平常時を含む年間スケールには出水の有無や各出水の規模、また風波による底質の巻き上げと潮汐による泥の流出が大きく影響していることが推定される。

(3) 十三湖スポット調査結果

十三湖底質スポット調査の結果として、各地点の表層の構成材料の粒径別割合を図-15に示す。十三湖中央付近のB地点において、冬季（平成21年3月）から夏季（平成21年9月）になるとシルト・粘土の割合が40%ほ

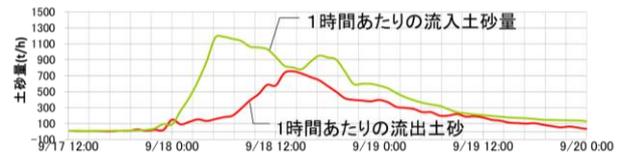


図-10 出水時の土砂収支

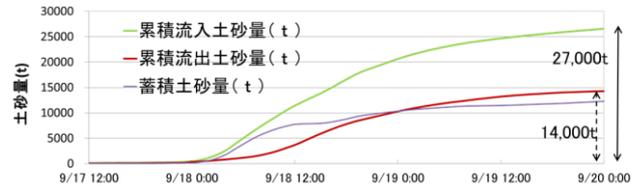


図-11 累計流入土砂量と累計流出土砂量

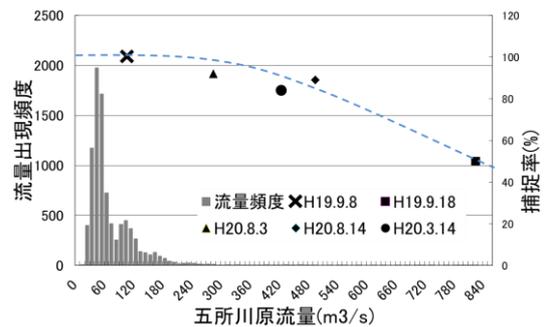


図-12 出水規模別捕捉率の算定

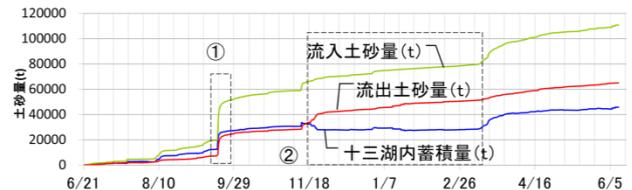


図-13 年間を通じた土砂量



図-14 月ごとの捕捉率

ど増加しており、さらに冬季にかけてその割合は減少している。B地点の全ての地点で同様の傾向が見られた。これは、上流から供給されるシルト・粘土は夏季には湖底に堆積し、冬季に風波による巻き上がりによって抜けているためであると考えられる。B地点は、図-2によると、標高約1.2m程度であり、砂が主成分となっている領域と、泥が主成分となっている領域の中間に位置しており、底質の入れ替わり等の環境変化が激しい地点であると考えられる。A,D地点ではB地点のような大きな変化が見られないが、これは、B地点に比べて標高が高く水深が浅いため掃流力が大きく、夏季にも泥が堆積しにくくなっているためであると考えられる。逆に、標高

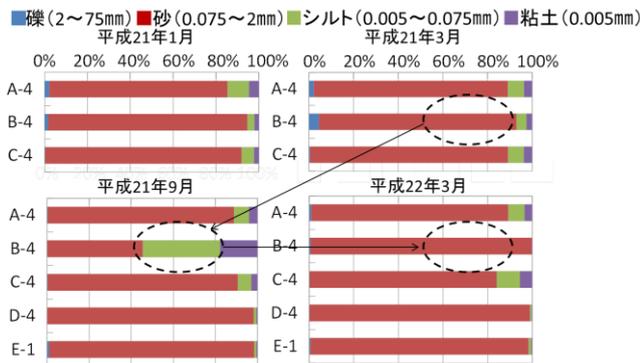


図-15 十三湖表層材料の粒径集団別割合

-1.2mよりさらに低い領域では、水深が深くなるため冬季にも巻き上げの影響を受けにくくなり、シルト・粘土が堆積しやすくなっている可能性がある。以上より、十三湖の底質に着目すると、以下①～③に示す3つに領域に区分でき、それぞれの決定機構は、地形や土砂動態と密接に関係していると考えられる。

① 主材料が砂であり、岩木川流入部河口デルタ斜面部等で標高が-1.0mより高い地点に分布し、泥は堆積しにくい。河川からの砂の供給が少ないため、当面は大きな変化はないと考えられる。

② 主材料が泥であり、標高が低く水深の深い地点に分布する。本研究で算定した年間通して補足される泥は、主にこの領域に堆積していると考えられる。

③ 主材料が砂又は泥であり、①、②の領域の中間に分布し、標高-1.2m程度で、平常時及び出水時に上流から供給された泥が堆積するが、風波による底質の巻き上げの影響を受けやすく、底質が頻繁に変化している。

5. 結語

土砂濃度・濁度の現地観測データを用いて、出水時及び、平常時を含む年間スケールにおける泥集団の定量的な収支を算定することで、十三湖の泥集団の捕捉に着目した土砂動態の実態把握を試みた。その結果、十三湖の捕捉の程度には、出水時にはその規模が、平常時を含む年間スケールには出水の有無や各出水の規模、また風波による底質の巻き上げと潮汐による泥の流出が大きく影響していることが示唆された。これらのことは、今後の汽水湖の環境管理において着目すべき事柄を検討する上での重要な手がかりとなる。

謝辞：本研究にあたり、国土交通省 東北地方整備局 青森河川国道事務所より様々なデータの提供して頂いた。ここに記し、感謝の意を表する。

参考文献

1) 豊田政史, 宮原一道, 北村聡, 宮原裕一, 富所吾郎 :

諏訪湖における底質の性状及び懸濁物質の挙動に関する現地観測, 水工学論文集, 第50巻, pp.1309-1314, 1996.

- 2) 横山勝英, 諏訪義雄, 二村貴幸, 谷口丞, 末次忠志 : 澗沼川下流域における土砂・栄養塩動態の特性, 水工学論文集, 第46巻, pp.659-664, 2002.
- 3) 海田輝之, 楠田哲也, 二渡了, 栗谷洋一 : 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, 第393号/2-9, 1988.
- 4) 山崎裕介, 二瓶泰雄, 大関雅丈, 今野篤, 西村司 : 都市河川河口域における土砂・栄養塩・有機物輸送特性に関する現地観測, 水工学論文集, 第48巻, pp.659-664, 2004.
- 5) Kasai A, Toyohara H, Nakata A, Miura T, Azuma N. Food source for the bivalve *Corbicula japonica* in the foremost fishing lakes estimated from stable isotope analysis. *Fish. Sci.*, 72, 105-114, 2006.
- 6) 佐々木幹夫, 田村保憲, 藤田豊 : 十三湖遡上塩水の挙動特性, 水工学論文集, 第41巻, pp501-507, 1997.
- 7) 高橋迪夫, 藤田豊, 佐々木幹夫, 池田道政, 川名慶紀 : 十三湖における出水後の水質の時・空間変動特性に関する現地観測, 水工学論文集, 第38巻, pp283-288. 1994.
- 8) 中村幹雄編著 : 日本のシジミ漁業, たたら書房, 2000.
- 9) 石田行彦, 梅田信, 田中仁, 佐々木幹夫, 長崎勝康 : 十三湖の水環境条件とヤマトシジミの生息状況, 東北地域災害科学研究, 第46巻, 2010.
- 10) 青森県水産総合研究センター内水面研究所 : ヤマトシジミ現存量調査報告書 (小川原湖・十三湖・高瀬川), 2007.
- 11) 国土交通省 東北地方整備局 青森河川国道事務所 : 岩木川・十三湖河床材料調査成果
岩木川・十三湖河床材料調査成果
- 12) 国土交通省 東北地方整備局 青森河川国道事務所 : 岩木川・十三湖定期横断測量成果
- 13) 平井幸弘 : 日本における海跡湖の地形発達, 愛媛大学, 愛媛大学教育学部紀要, 1994.
- 14) 海津正倫, 津軽平野の沖積世における地形発達史, 地理学評論, 49, pp11, 1976.
- 15) 村山磐, 松本秀明, 宮城豊彦 : 津軽平野の沖積層及びその周辺の地形, 東北学院大学東北文化研究所紀要, 1984.
- 16) 水理公式集, 土木学会, pp.391, 1999.
- 17) 山本晃一 : 沖積河川-構造と動態-, 技報堂出版, pp157, 2010.
- 18) 水理公式集, 土木学会, pp.121, 1999.

(2010. 9. 30受付)