

# 諏訪湖における底質の性状および 懸濁物質の挙動に関する現地観測

FIELD MEASUREMENT OF THE SEDIMENT PROPERTIES  
AND THE SUSPENDED SOLID BEHAVIOR IN LAKE SUWA

豊田 政史<sup>1</sup>・宮原 一道<sup>2</sup>・北村 聡<sup>3</sup>・宮原 裕一<sup>4</sup>・富所 五郎<sup>5</sup>

Masashi TOYOTA, Kazumichi MIYAHARA, Satoshi KITAMURA,  
Yuichi MIYABARA and Goro TOMIDOKORO

<sup>1</sup>正会員 工修 信州大学助手 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

<sup>2</sup>正会員 修(工) 大東設計コンサルタント (〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町3-38)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 日本技術開発株式会社 大阪支社水環境部 (〒531-0072 大阪市北区豊崎5-6-10)

<sup>4</sup>薬博 信州大学助教授 山地水環境教育研究センター (〒392-0027 諏訪市湖岸通り5-2-4)

<sup>5</sup>正会員 工博 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

The sediment properties were grasped at 22 sites in Lake Suwa. Secondly, turbidity, chlorophyll-a and velocity near the bottom at shallow water zone( water depth 1.7m) were measured. The results indicated that The properties of the sediment varied according to the water depth, and especially at rivermouths, where under the strong influence of waves and currents, they were different from those of the other sites. The critical bed shear stress for sediment resuspension caused by the wind wave and the flood was from 0.01 Pa to 0.1 Pa. Plankton floating in the water, which corresponds to the almost same turbidity as the case of sediment resuspension, moved with the wind induced current in the growth phase of plankton.

**Key Words** : Lake Suwa, field measurement, sediment, resuspension

## 1. はじめに

諏訪湖の湖底には、窒素・リンなどの栄養塩を含んだ底質が堆積しており、長年続いている富栄養化の原因の一つになっている。また、近年話題になっている有害環境化学物質という観点でみると、Ikenaka et al.<sup>1)</sup>が諏訪湖底質中のダイオキシン類を測定しており、 $31.4 \pm 6.5$  (pg-TEQ/g-乾燥泥) という結果を得ている。この値は、環境基準値150 (pg-TEQ/g-乾燥泥) と比べると小さな値である。しかし、その起源の調査結果から、現在でも陸域の土壤中に蓄積されたダイオキシン類が出水時に土壤に付着して湖内へ流入・堆積し続けていることがわかっている。濃度は、環境基準値以下であるが、自然状態の10倍近い濃度であることを考える<sup>2)</sup>と、今後湖の生態系になんらかの影響を与える可能性があるといえる。

また、どのような種類(粒径や含水比など)の底質が空間的にどう分布しているか、そして懸濁物質に関して河川を通した流出入および湖内における移流拡散および沈降・巻き上げといった物質循環過程がどのようになっているかは、湖ごとに異なっている。対象とする湖に応じた水質改善策を講じるにあたっては、湖ごとの底質の性状および物理特性を把握しておくことが重要となる。

これまで、沿岸域や陸水域で湖底堆積物の移動に関する現地観測による研究が多くなされてきている。たとえば、沿岸域では、東京湾奥部で高波浪時の底面付近の濁度に注目し、風波の有義波高および有義周期から求めた波による底面せん断応力と濁度上昇の関係を検討した研究<sup>3)</sup>や、広島湾で大潮・小潮の潮流変化を含む長期間にわたる濁度変動を示した研究<sup>4)</sup>がある。また、陸水域では、霞ヶ浦において、底泥の巻き上げ現象を風向・風速・湖流・波浪および濁度の観測結果により考察した研究<sup>5)</sup>がある。一方、諏訪湖では、水質・底質に関する化学・生物学的な研究は多くみられる<sup>6)</sup>が、「水の動き」にともなう物質循環に関する研究はあまり行われていない。

われわれは、諏訪湖の物質循環に関して「水の動き」をふまえて総合的に評価することを最終目標としており、本論文では底質の巻き上げに着目した観測結果を示す。巻き上げ現象は、底質の粒径や含水比などの物性値に依存するため、まず、湖内 22 地点において採取した底質の分析結果をもとに、底質の粒径・含水比の平面分布を把握する。次に、懸濁物質の輸送と湖流・風波・流入河川との関係を明らかにする目的で、底面付近の流速および濁度・クロロフィルの連続観測結果を考察し、諏訪湖における底質の巻き上げと外力との関係を検討する。

## 2. 観測の概要

図-1 に諏訪湖の概要を示す．流入河川は 31 河川存在し，流域面積の大きいものから，上川，宮川，砥川，横河川の順になっており，これら 4 河川で諏訪湖全流域面積の約 8 割を占めている<sup>7)</sup>．流出河川は 1 河川で，諏訪湖に流れ込んだ水は釜口水門より天竜川となって流出している．また，宮川と半之木川は，1 本の河川（宮川）が河口付近で分かれたものである．

本研究では，図-1 に示す地点 A～V の 22 地点の底質を採取し，分析を行った．なお，図中の地点名の横には，かっこ書きで水深を示してある．採取は，2003 年 6 月 17 日（地点 G～V の 16 地点）および 2004 年 9 月 21 日（地点 A～F の 6 地点）に行った．両観測日とも，直前 2 週間に大きな出水はなかった．本研究では，エクスマンバージ採泥器を用い，表層 3～5 (cm) の底質を採取した．また，分析は土の粒度試験方法（試験分類：物理試験，規格番号：1204）<sup>8)</sup> に準じて行った．なお，試料の分散を行うとき，試料に過酸化水素を入れると，沈降分析の段階で土粒子が綿毛化し，正確に分析できなかった．そのため，試料には分散剤のみを加えて分析を行った．

また，図-1 中の地点 A において，2004 年 9 月 21 日から 11 月 11 日までの 52 日間にわたり底面付近の流速および濁度・クロロフィルの定点係留連続観測を実施した．この地点は水深が小さく（水深 1.7 (m)），諏訪湖の卓越風である北西の風を受けると吹送距離が大きくなるという特徴をもつ．また，この地点は半之木川の河口部に位置し，洪水時には河川より懸濁物質が大量に流入することが予想される．本研究では，小型メモリークロロフィル濁度計（アレック電子（株）製，compact-CLW）と小型メモリー流速計（アレック電子（株）製，compact-EM）を底面から約 30cm 上に設置し（図-2 参照），測定時間間隔を 10 分（1 回の測定あたり時間間隔 0.5 (秒)），サンプル個数 20 個）に設定した．さらに，観測期間前後での底質の組成変化をみるために，観測開始時と終了時に，観測地点において底質を採取した．

## 3. 底質の粒径および含水比の平面分布

表-1 に分析結果として，湖内 22 地点での 50% 粒径・均等係数・含水比を示す．全体的に，水深の小さい沿岸部の方が，水深の大きい湖心部よりも粒径が大きくなっている．これは，沿岸部では波や流れによって底質が洗掘されていることを表している．

沿岸部の中で特に，地点 D・K の粒径が大きい．これは，この 2 地点が流入河川の河口部に位置するため，洪水時に大きい流量の河川水が流入したときに，その流れ



図-1 諏訪湖の概要と観測地点（図中の実線は等深線）

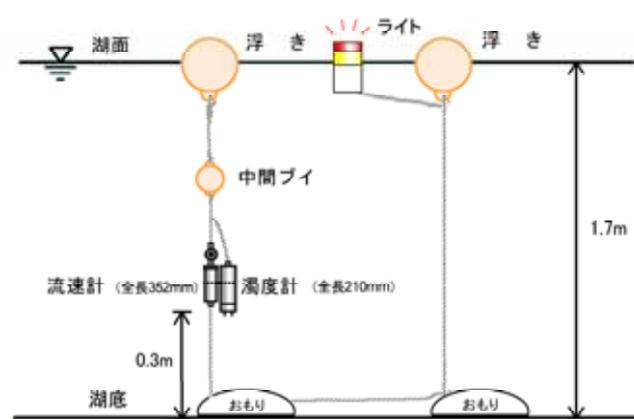


図-2 定点係留連続観測の方法

表-1 各測点における底質の 50% 粒径・均等係数・含水比

測点	水深(m)	50%粒径(mm)	均等係数	含水比(%)
A	1.7	0.040	51.33	155
B	2.5	0.047	9.42	158
C	2.0	0.043	10.41	200
D	0.9	0.191	2.16	57
E	2.5	0.092	13.70	155
F	1.7	0.052	9.81	263
G	5.4	0.005	3.39	486
H	4.7	0.013	13.56	409
I	1.8	0.030	33.72	198
J	1.9	0.017	16.42	176
K	4.3	0.192	2.23	54
L	0.7	0.032	6.55	371
M	2.4	0.062	54.95	197
N	0.6	0.328	3.57	39
O	0.6	0.327	3.07	38
P	3.5	0.004	6.19	434
Q	4.3	0.006	4.78	536
R	4.5	0.006	4.11	534
S	1.6	0.215	1.99	47
T	5.5	0.004	6.51	523
U	5.1	0.019	32.35	283
V	6.1	0.009	6.75	970

によって細かい粒子が洗掘され、粗い粒子が残った結果と考えられる。また、上川河口部の地点 L の粒径が地点 K よりも小さい。ここには示さないが上川の流量データをみると、底質採取前約 40 日間に大きな出水がなかった。このことを考慮すると、洪水時に河口部が洗掘されたのちに、平水時に河川から流入する懸濁物質が地点 K まで運ばれずに地点 L 付近に沈降していると推測できる。また、半之木川河口部の地点 A と M においても同様の現象が起きていると考えられる。しかし、砥川河口部の地点 D では、その沖合いの地点 U と比べて粒径が大きい。また、地点 D の均等係数は小さい。これらより、地点 D では平水時でも河川から供給された微細粒子があまり堆積せず、仮に堆積しても、流れによって洗掘されていると予想される。また、地点 U において、均等係数が大きいことから粗い粒子が存在していることがわかり、この地点も洪水時に河川水の影響を受けていると考えられる。

釜口水門付近に位置する地点 S の粒径が大きい。釜口水門では流速が大きいため、細かい粒子は洗掘され湖外へ流出するが、粗い粒子は洗掘されず湖内に堆積していると考えられる。また、地点 N と O の粒径が他の地点と比べてかなり大きい。これは、両地点が波による洗掘の影響を受けやすい、あるいは観測地点よりも沖からの微細粒子が運ばれにくくなっていることを示している。さらに、湖の西側に位置する地点 P, Q, R の粒径が他の地点よりかなり小さい。これらの詳細な原因解明のためには、波や流れの場の検討が必要であるので、現在、流動観測結果<sup>9)</sup>を解析中である。

図-3に、底質の50%粒径(y)と含水比(x)の関係を示す。図中には指数近似式とR<sup>2</sup>値も示している。これを見ると、50%粒径が小さくなるほど含水比が大きくなっていることがわかる。また、表-1において、特に地点D・K・N・O・Sの含水比が小さい。三角座標による土質分類をみると、湖内のほとんどの場所で底質がシルトであるのに対して、上述5地点の底質は砂であるといえる。

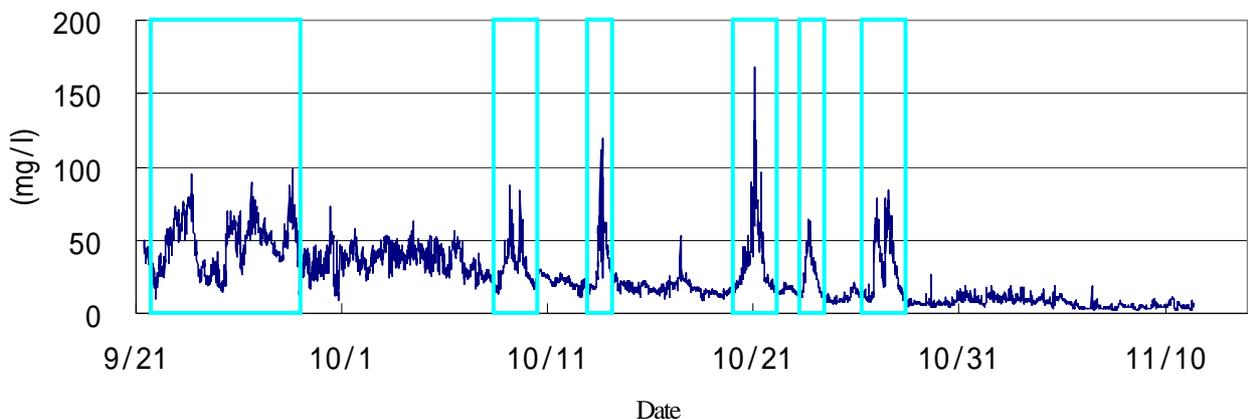


図-3 底質の50%粒径と含水比の関係

#### 4. 底質の巻き上げ観測

本章では、2. で述べた底面付近の定点連続観測結果をもとに考察する。ここでは、10 分ごとの値 (SS および流速：サンプル個数 20 個の平均、風速・風向：諏訪特別地域気象観測所のデータ) を用いて図化する。

図-4に、観測期間 (2005年9月21日～11月11日) におけるSS (底面+30cm) の時系列変動を示す。濁度からSSへの換算については、さまざまな式が用いられている<sup>10), 11)</sup>が、本研究では、濁度計による11月11日9時10分の濁度の観測値 (2.7ppm) と、同時刻に採取した湖水を濾過し、フィルター上の物質を乾燥させて求めたSSの値 (4.66mg/l) が比例関係にあると考え、

$$SS = 1.726T_b \quad (1)$$

を用いた。ここに、 $T_b$  (ppm)：濁度、SS (mg/l)：懸濁物質濃度である。この換算は一点校正のため精度は低い。しかし、底泥の巻き上げに関する既往研究<sup>11), 12), 13)</sup>では濁度ではなくSSで議論していることが多く、値の目安を知るためにこのような処理を行った。

図-4をみると、観測期間中にSSが減少傾向にあることがわかる。これは、季節変動 (秋 冬) により、水温が低下することにもなう生物活性の現象によるものと推測される。また、四角で囲ってある期間にSSが大きく上昇していることがわかる。以下、これらの上昇について詳しく検討を行う。

図-4 観測期間中のSS (底面+30cm) の時系列変動

(1) 洪水流によるSSの上昇

図-5 に、10月8日から10日までのSS・流速ベクトル・風速ベクトルおよびそれらの結果をもとに算定した流れによるせん断応力・波によるせん断応力を示す。なお、この図には宮川の流量もあわせて示してある。ここで、宮川流量の観測地点は、2. で述べた半之木川と宮川の分岐点より上流である。また、流れによるせん断応力・波によるせん断応力の算定方法の詳細は、それぞれ参考文献 14), 15) を参照されたい。図-5 をみると、10月9日3時頃より半之木川から流出したと思われる北向きの流速の増加にともなってSSが上昇していることがわかる。このときの宮川流量は最大で約  $60 \text{ (m}^3\text{/s)}$  となっており、平水時の平均流量  $3.0 \text{ (m}^3\text{/s)}$  に比べてかなり大きな値を示している。また、SS上昇時の波によるせん断応力は、突発的に最大で  $0.054 \text{ (N/m}^2\text{)}$  を示しているが、流れによるせん断応力に対して小さく、この期間においては波がSSの上昇に与える影響は小さいといえる。したがってこの期間は、河川流量の増加による高濁度水

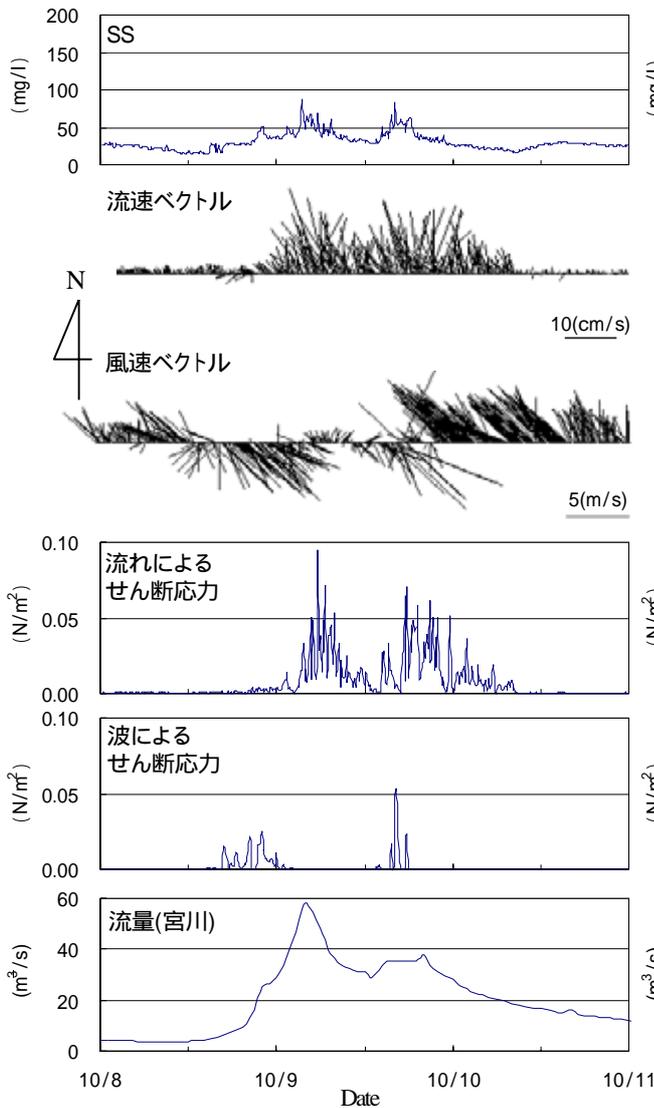


図-5 洪水流によるSSの上昇 (10/8~10/10)

塊の流入と、北向きの大きな流速による底質の巻き上げのどちらかにより、あるいは両方が複合的に影響し、SSが上昇したと考えられる。

(2) 風波によるSSの上昇

図-6に、10月26日から28日までのSS・流速ベクトル・風速ベクトルおよび流れによるせん断応力・波によるせん断応力を示す。なお、この図にも宮川の流量をあわせて示してある。10月26日19時から28日2時まで5~10 (m/s) 程度の西北西の風が吹き続けている。流速は最大で  $6.3 \text{ (cm/s)}$  と比較的小さく、流れによるせん断応力は波によるせん断応力に比べてかなり小さい。したがって、風波による底質の巻き上げがSSの上昇の主な原因と考えられる。また、ここには示さないが、図-4でみられる10月13日~14日および22日~23日のSSの上昇でも同様の傾向がみられた。さらに、観測期間中の最大値を示した10月20日~22日のSSの上昇は、洪水流と風波の両方の影響を受けていると推測された。

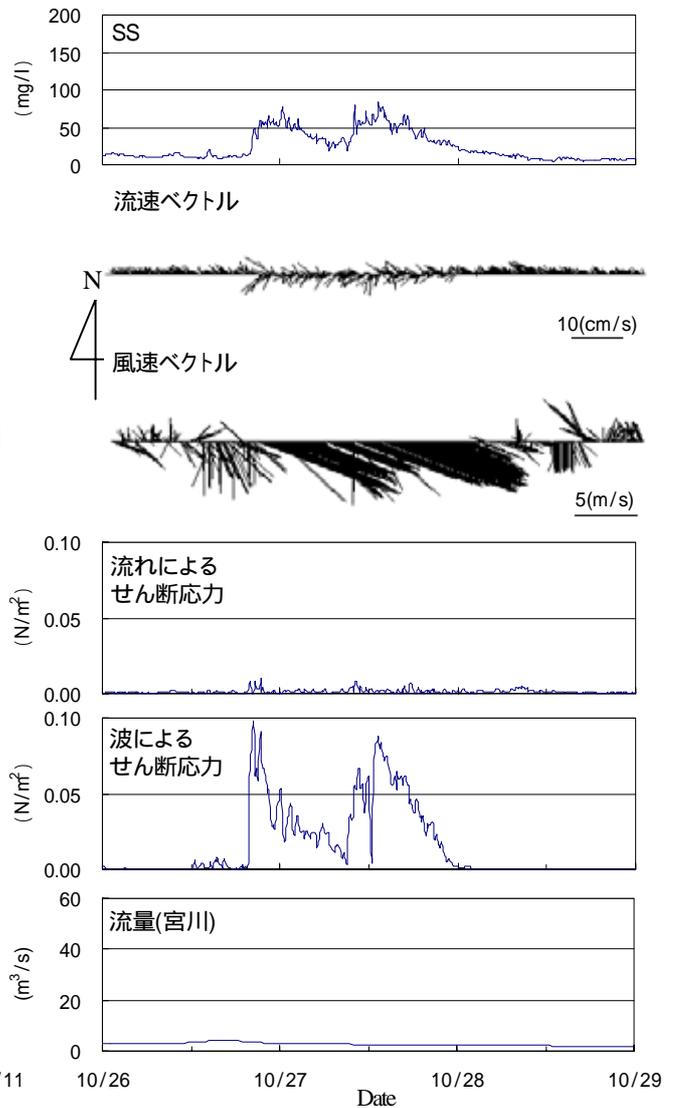


図-6 風波によるSSの上昇 (10/26~10/28)

### (3)底質の限界底面せん断応力について

(1), (2)の結果から底質の巻き上げは、洪水流と風波が主な原因であるといえる。しかし、本観測では洪水時における流入河川水のSS濃度を測定していないため、河川からの移流効果によるSS上昇の度合いはわからない。そこで、ここでは風波による底質の巻き上げが起こったと考えられる期間中における風波によるせん断応力とSSの関係を図-7に示す。これをみると、せん断応力が0.01 (N/m<sup>2</sup>) から0.1 (N/m<sup>2</sup>) の間でSSが急激に上昇していることがわかる。したがって、今回の観測地点においては、この程度の外力が作用すると底質が巻き上がると考えられる。これは、これまでに提唱されている限界底面せん断応力<sup>3),16),17)</sup>にほぼ一致する値となった。

### (4)アオコの移動にともなうSSの上昇

図-8に、9月22日から25日までのSSおよびクロロフィル、風速・風向を示す。この図から、SSおよびクロロフィルが全く同じ変動傾向を示していることがわかる。ここには示さないが、(1), (2)のSS上昇時は、SSとクロロフィルの変動傾向は異なっている。風向の図をみると、9月22日9時から9月23日16時まで北西、その後は25日の7時まで南東、そして再び北西の風が吹いていることがわかる。SSおよびクロロフィル量は、風向が北西のときに増大、南東のときに減少の傾向を示しており、風速の大小に依存していない。観測点が湖南東部にあること、観測開始時(9月21日)に湖内にアオコが発生していたことをふまえると、この期間のSSの変動は、水中に浮遊しているアオコの吹送流による移動が原因であると考えられる。

### (5)観測期間中の底質組成の変化について

図-9に、観測開始時(9月21日)と終了時(11月11日)の粒径加積曲線を示す。この図をみると、50%粒径および100%粒径はほぼ同じであるが、観測期間前後で、相対的に0.05 (mm)より小さい粒子が減少し、0.05 (mm)より大きな粒子が増加していることがわかる。これは、定点観測地点において観測期間中に、洪水流や風波により、細かい粒子が巻き上がり他の場所に輸送されたこと、洪水流により、河川から粗い粒子が輸送されてきたことによるものと考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、まず、諏訪湖における底質粒径および含水比の平面分布を把握するために、湖内22地点における底質の粒度分析を行った結果、以下のことがわかった。

河口部では、流入河川水による洗掘の影響で粒径

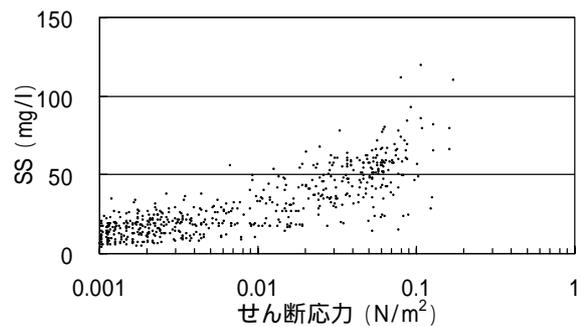


図-7 SS - 底面せん断応力の関係  
(風波による底質巻き上げ時)

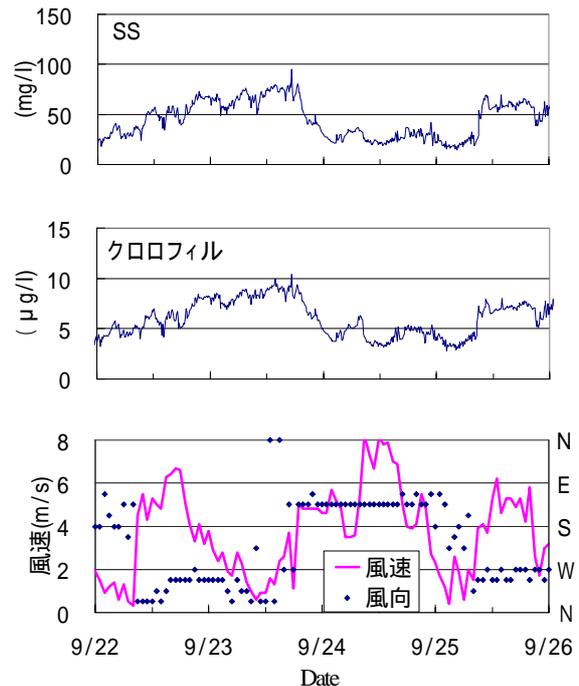


図-8 アオコの移動にともなうSSの上昇

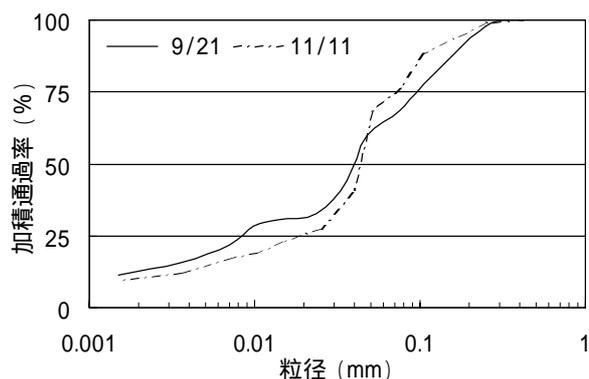


図-9 観測期間前後の粒径加積曲線

が大きい。また、河川ごとに河口部における底質の洗掘・堆積の傾向は異なる。湖内において、局所的な底質粒径の大小が存在した。これは、波や流れ場の影響によると考えられる。粒径が小さくなるほど含水比は大きくなる。洗掘の影響が大きい地点の底質は砂である。

次に、諏訪湖における懸濁物質輸送と湖流・風波・流入河川の関係を見るために、湖南東部の水深 1.7 (m) 地点において、底面付近の流速および濁度・クロロフィルの連続観測を行った結果、以下のことがわかった。

河川流量が大きいときには、河川からの高濃度懸濁物質流入の影響、あるいは洪水流による底質の巻き上げの影響を受けて、SS が上昇する。

吹送距離が大きくなる北西の風が 5.0 (m/s) 程度以上で吹くと、風波の影響により底質が巻き上がる。底質が巻き上がり始めるのは、底質に 0.01 ~ 0.10 (N/m<sup>2</sup>) 程度のせん断応力が作用したときである。アオコ発生時には、底質巻き上げ時と同程度の濁度に相当する量のアオコが、吹送流とともに湖内を浮遊する。

現在、本観測で求めた粒径分布に応じた懸濁物質輸送解析モデルを作成中である。今後は、懸濁物質輸送に関してさらなる観測を行うとともに、このモデルを用いて、湖内の物質循環に大きな影響を及ぼすと考えられる洪水時における懸濁物質の輸送現象と堆積状況を予測する。そして、そのモデルに化学物質の吸脱着などの生物化学過程を組み込むことにより、諏訪湖の物質循環過程を詳細に検討していく予定である。

謝辞：現地観測では信州大学山地水環境教育研究センターの花里孝幸教授および学生の方々に、底質の粒度分析では信州大学工学部社会開発工学科土質力学研究室の方々に多大なるご協力をいただきました。また、気象庁長野地方気象台より風向・風速データを、長野県諏訪建設事務所より河川流量データを提供していただきました。さらに、研究全般において、本学卒業生である寺沢和晃氏、萩庭康光氏、中田俊也氏にご協力をいただきました。また、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤(A)17201012「水質浄化対策が引き起こす富栄養湖の生態系構造の変化とそのメカニズムの解明(研究代表者：花里孝幸)」の補助を受けている。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Ikenaka, Y., Eun, H., Watanabe, E., and Miyabara, Y.: Congener profiles of PCDDs, PCDFs and coplanar-PCBs in sediment from lake Suwa in Japan, *Organohalogen Compounds*, Vol. 62, pp.69-72, 2003.
- 2) 沖野外輝夫：諏訪湖月報 12月'04, 月刊「水」2005年3月号, p.43, 2005.
- 3) 中川康之：東京湾奥部での底泥巻き上げとその粒度分布特性について, 海岸工学論文集第 49 巻, pp.1046-1050, 2002.
- 4) 朱小華, 高杉由夫, 橋本英資, 安田秀一：広島湾における底層懸濁物質の濃度変動, 海岸工学論文集第 47 巻, pp.1076-1080, 1999.
- 5) Otsubo, K. and Muraoka, K.: Field Studies on Physical Properties of Sediment and Sediment Resuspension in lake Kasumigaura, *Jpn.J.Limnol.*, Vol.48, S131-S138, 1987.
- 6) たとえば福島武彦, 川村修平, 恩田裕一, 今井章雄, 松重一夫：霞ヶ浦, 諏訪湖における底質長期変化と栄養塩収支, 水環境学会誌, Vol.28, pp.313-319, 2005.
- 7) 長野県諏訪建設事務所, (財)河川環境管理財団：諏訪湖浚渫に関するモニタリング調査委員会 第 3 回委員会資料, pp.59-67, 1999.
- 8) 地盤工学会：土質試験の方法と解説 - 第一回改訂版 -, pp.69-79, 2001.
- 9) 宮原一道, 寺沢和晃, 豊田政史, 富所五郎：ADCP を用いた諏訪湖の流動観測, 平成 16 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, -41, 2005.
- 10) 横山勝英：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, 土木学会論文集 No.698/ -58, pp.93-98, 2002.
- 11) 中川康之, 今林章二, 末次広児：有明海の底泥輸送現象に関する現地データの解析, 海岸工学論文集第 49 巻, pp.566-570, 2002.
- 12) 稲垣聡, Stephen G. Monismith, Jeffery R. Koseff, Jemedy D. Bricker：南サンフランシスコ湾における底泥輸送解析, 海岸工学論文集第 48 巻, pp.641-645, 2001.
- 13) 大坪国順, 村岡浩爾：霞ヶ浦における底泥の再浮上に関する現地観測およびシミュレーション, 第 29 回水理講演会論文集, pp.353-358, 1985.
- 14) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp.58-59, pp.191-193, 1993.
- 15) 豊田政史, 北村聡, 富所五郎：諏訪湖における風波の影響を考慮した底泥の輸送解析; 水工学論文集第 47 巻, pp.1213-1218, 2003.
- 16) Maa, J.P.-Y., Sanford, L. and Halka, J.P.: Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbor, Maryland, *Marine Geology*, Vol.146, pp.137-145, 1998.
- 17) Black, K.S., Tolhurst, T.J., Paterson, D.M., and Hagerthey, S.E.: Working with Natural Cohesive Sediments, *Journal of Hydraulic Engineering*, pp.2-9, 2002.

(2005.9.30受付)