

桧原湖における底質組成の特性に関する研究

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF BOTTOM SEDIMENTS IN LAKE HIBARA

小川 裕正¹・長林 久夫²・平山 和雄³

By Yasutada OGAWA, Hisao NAGABAYASHI and Kazuo HIRAYAMA

¹学生員 工修 日本大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒963-1165 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

²正会員 工博 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-1165 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

³非会員 工博 日本大学教授 工学部物質化学工学科 (〒963-1165 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

The characteristics of bottom sediments are most important that factor of water quality in epilimnion of summer. This study of aims at to make clear bottom sediments based on flow process from heavy metals and nutrient salts. Heavy metals and nutrient salts of bottom sediments were investigated based on quantity and qualitative analysis in Lake Hibara. The characteristics of geographical distribution of heavy metals and nutrient salts were shown in bottom of this lake. Transportation of heavy metals and the process of generating were shown from the relation between particle diameter and nutrition salt.

Key Words : Lake Hibara, bottom sediments, heavy metals, nutrient salts, soilfraction

1. はじめに

湖沼等の閉鎖性水域は、上流域の汚濁発生源から供給される栄養塩類の流入により富栄養化が進行する。これらの多くの栄養塩類は長期にわたって湖内に沈降・堆積し湖底に広く分布している。また底泥による湖内の溶存酸素を消費し、栄養塩・重金属等の溶出のために深水層の水質は低下することが知られている。従って、底泥の分布特性は湖沼の物質循環や内部負荷の評価、また底泥の再浮上機構を解明する上でも重要である。

これまで多くの湖沼で底泥の巻上げ・沈降等の物理過程や底質の化学・生物特性から底泥の水理・水質特性が報告されているが、これら多くの湖沼は水深が比較的浅く、また汚濁の進行が著しい富栄養湖を対象としたものが多い。^{1), 2), 3)}湖沼は周辺環境に強く依存している為に、生物・化学的及び物理特性が異なりより多くの観測資料と検証が必要である。

本論文は福島県裏磐梯流域の山間地の最上流に位置し比較的汚濁負荷の少ない中栄養の桧原湖を対象とし面的な底泥の採取を行い、底質分析の結果をもとに底質組成の同定及び定量的な評価を行った。これより、栄養塩・重金属類の分布状況を明らかにした。また粒径や栄養塩溶出実験の結果と併せて考察を行い、重金属類の輸送や発生の過程を示した。

2. 桧原湖概要及び調査・分析方法

(1) 桧原湖概要及び現地調査

図-1に桧原湖の概略図及び底泥採取地点を示す。桧原湖は磐梯山の噴火によって形成された山間地の堰止め湖である。桧原湖は水面標高 822m、流域面積 106km²、水面積 10.4km²、最大水深 30.5m、貯水容量 12759 万 m³の湖である。山間部の堰き止め湖の特徴として、湖岸は屈曲に富み、山腹斜面がそのまま水中に没する所が多い。冬期には寒冷山間地の為湖面が結氷する典型的な山間地湖沼の特徴を有している。40 年程度の時間スケールで見たときには緩やかではあるが透明度の減少が見られ、緩慢に汚濁が進行しているリン制限の中栄養湖である。底泥試料の採取は、2003 年 8 月に実施した。採取地点は流入河川の流入部付近と最深部を含む 13 地点である。

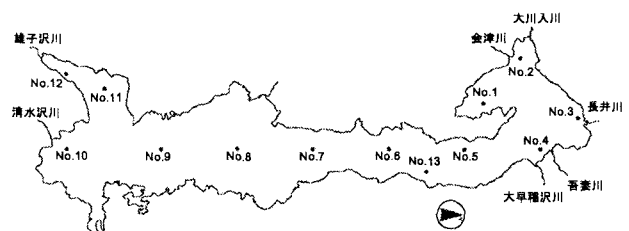


図-1 桧原湖外略図及び底泥採取地点

(2) 底泥採取方法及び分析方法

底泥採取には大きく分けてバルク採取と柱状試料で採取する方法の2つがあるが、本研究では底泥の水平分布調査を目的として、エクマン・バージ式採泥器(容積 15cm×15cm×15cm)を用いて行った。垂直方向の分布試料は乱されるものの、各地点において試料の量的な統一が保たれ採取されたものと考えられる。また表層から約 5cm 程度の底泥を採取した。底泥は HORIBA LA-920(レーザ回折散乱式粒子粒径分布測定装置)を用いて粒度分布の測定を行った。また採取した試料を乾燥させ十分に乱して均一にした粉末試料を EDX-900(エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置島津製作所製)による金属類の定性分析及び定量分析を行った。さらに湿潤重量を測定後 110℃の乾燥器で 2 時間乾燥させ、乾燥重量を測定して含水比を求めた。その乾燥試料を用いてマッフル炉により 700℃で 2 時間強熱処理を行って強熱減量を求めた。底泥からの栄養塩の溶出量を知る為に底泥溶出試験についても行った。溶出試験において底泥の乾燥固形分の重量と試験溶液(蒸留水)の体積比(g/ml)が 3/100 になるように湿泥を加え 2 時間以上の攪拌を行い、その上澄み液を 1μm フィルターでろ過後、ろ液中の全窒素(T-N)、全リン(T-P)及び無機態窒素(NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N)について DR2000(セントラル科学社製)を試験法に準じて分析を行った。

3. 結果及び考察

(1) 底泥の粒度分布特性

図-2 に採取した各地点の深度と平均粒径の分布図を示す。中央粒径 d_{50} と平均粒径が最も小さい地点は最深部に近い No. 6 で観測され中央粒径 18μm、平均粒径 28μm であった。最深部の中央粒径 20μm、平均粒径 38μm とほぼ同様な分布を示している。最深部を含め湖の No. 5~No. 9 の湖長手方向における中央部では中央粒径 18~32μm、平均粒径 28~49μm であり、80%以上が細粒分のシルト質で構成されていることが分かる。北部水域と南部水域付近の No. 2~No. 4、No. 10~No. 12 において中央粒径 36~101μm、平均粒径 54~115μm となり、やや粒径が大きく砂質分が増加している。No. 12 においては約 70%が粗粒分の砂で構成されている。また図-3 に粒径加積曲線を示す。ここでは主要な流入河川の流入部付近である No. 2~No. 4、No. 10 と No. 12 そして最深部である No. 13 を示す。No. 2~No. 4 では曲線勾配が緩く大小の粒径が比較的広範囲にわたり分布している。No. 10 においても同様な傾向が見て取れる。しかし No. 12 地点において粒径は非常に荒いものとなっている。堆積する底泥の粒径は河川の出水規模にも依存するが、一般に大きな粒子ほど河口部付近において早い段階で沈降し、湖内には細かい粒子が

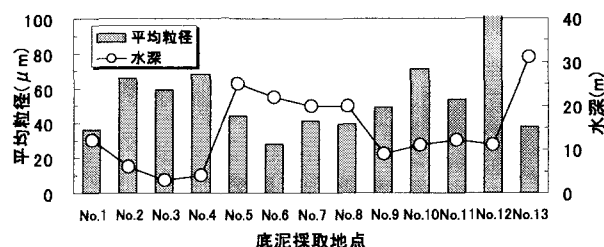


図-2 平均粒径分布図

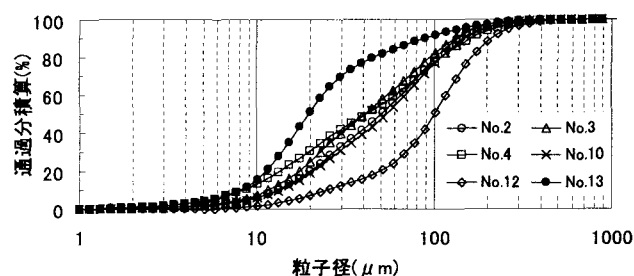


図-3 粒径加積曲線

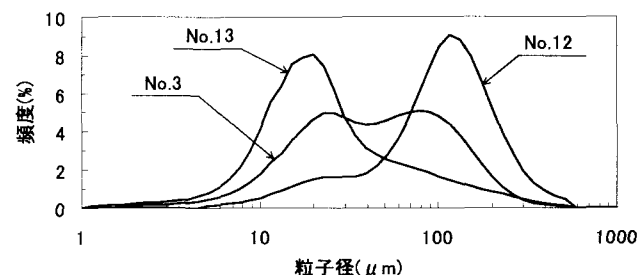


図-4 粒径頻度分布

流入する。これらは堆積する底泥の代表粒径を表しているものと考えられる。桧原湖に流入する河川は河川勾配が 1/50 以上の急峻な河川であり、平時及び出水時において北部水域の河川からの流量が卓越することが観測されている。しかし南部水域から流入する清水沢川及び雄子沢川は最も急な河川勾配を有しており約 1/16 程度である。このことから出水時において河川から流送された流域からの土粒子が主な構成物質であると考えられる。また底泥への影響には風速・風向による攪乱作用が大きく関与するものと考えられる。桧原湖流域では西南西の風が非常に卓越しており、No. 12 付近においては吹送距離が短く、掃流力が小さいことが予想され、特に複雑な入り江を形成していることから底泥は堆積しやすい状況にあるものと思われる。後述にも記すが、雄子沢川の流域はブナ、カエデ、トチなどの落葉広葉樹が繁茂しており、底泥は黒色の腐葉土であったことから No. 12 地点においては比較的粒子の粗い底泥が堆積しているものと考えられる。

図-4 に粒径頻度分布図を示す。これより桧原湖においては底泥の粒度分布には大きく 2 つの特徴を有している。最深部の No. 13 及び No. 12 地点では、頻度分布

曲線に1つのピークを有するものとNo. 3のように2つピークを持つものがある。大半の地点がこの後者にあたり、大小の粒径が比較的、均等に分布している。この状況は阿武隈川での出水時においても観測⁴⁾されており出水初期の増水期においては100 μ m程度の粗粒分の粒径のものが多く、流量ピーク時には20 μ m程度の細粒分に移行し、減水期には増水期同様に粗粒分が増加している。特に水深が深い地点には細かい粒子が流送され、微細な粒子が堆積し、河口付近においては粒径の大きい粒子が混在して分布している。またこれらについては今後、粒子の自重に伴う沈降等、地形条件や湖流特性を詳細に検討していく必要がある。

(2) 底泥の含水比及び強熱減量

図-5に各採取地点における底泥の含水比W(%)及び強熱減量VS(%)の試験結果を示す。含水比と強熱減量の関係を見ると、増減の傾向が類似している。桧原湖全域において底泥の含水比は82%~451%、強熱減量は7%~37%の値を示しており、採取地点における場所の違いが著しい。この差の生じる要因として底泥での堆積状況や土粒子の大きさ、また形状に大きく影響されているものと思われる。特に底泥表層部においては粒子の自重が小さい場合、堆積状況は土粒子個々の特性が大きく影響する。北部水域にあるNo. 2~No. 4及び南部水域のNo. 10では水深が浅く約5m程度であることから圧密の影響も他の地点と比較するとそれほど大きいものではないと考えられる。粒径も約30%が粗粒分の砂で構成されており、主要な河川が流入している場所では土粒子の粒径も比較的大きいことから、粒子に吸着する有機物含有量⁵⁾が少ないため、強熱減量の値も低いものと考えられる。一方、湖沼のほぼ中央における縦断方向でのNo. 5~No. 9、特に南部水域のNo. 11、No. 12地点と最深部であるNo. 13地点で高い値を示している。これらの地点では水深が10m以上であることから圧密荷重も大きくなり、外部的な因子の影響も少ないものと考えられる。また粒径は細粒分のシルト質で構成さ

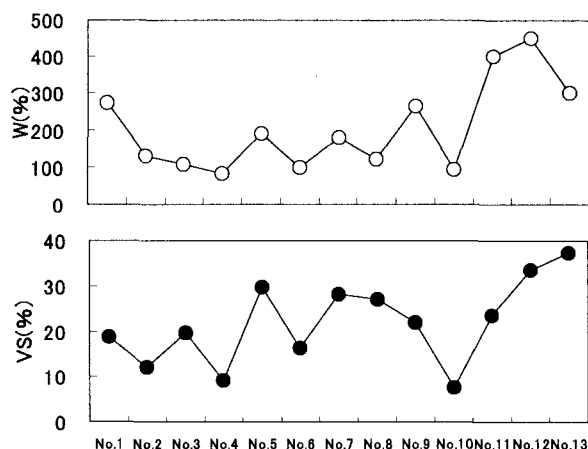


図-5 含水比と強熱減量の関係

れていることから、浮遊性のデトリタス等の沈降物質の影響が大きいと考えられる。また底泥の堆積時間も長いものと思われ有機物が高い値を有しているものと思われる。この有機物を多く含んだ土粒子は含水比が非常に高くなる傾向にある。

(3) 底泥における金属類の同定及び定量評価

図-6、表-1にEDX-900(エネルギー分散型蛍光X線分析装置)を用いて、底泥中に含まれる金属類の定性分析及び定量分析の試験結果を示す。ここでは各地点での含有物質をX線強度により算定しており、これらは試料厚さや粒径により異なることから、桧原湖全流域における絶対量の評価を行う為に、各地点における含有率を正規化(%)として表示する。桧原湖においては15種類の元素が確認された。以下にこの正規化の算定式を(1)式に示す。

$$R_{ij} = \frac{S_{ij}}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_{ij}} \cdot \frac{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m C_{ij}}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 R : 正規化(%), C : 対象物質の含有率(%), S : 対象物質の反射強度(cps/uA), n : 検出された元素の数, m : 観測地点数である。

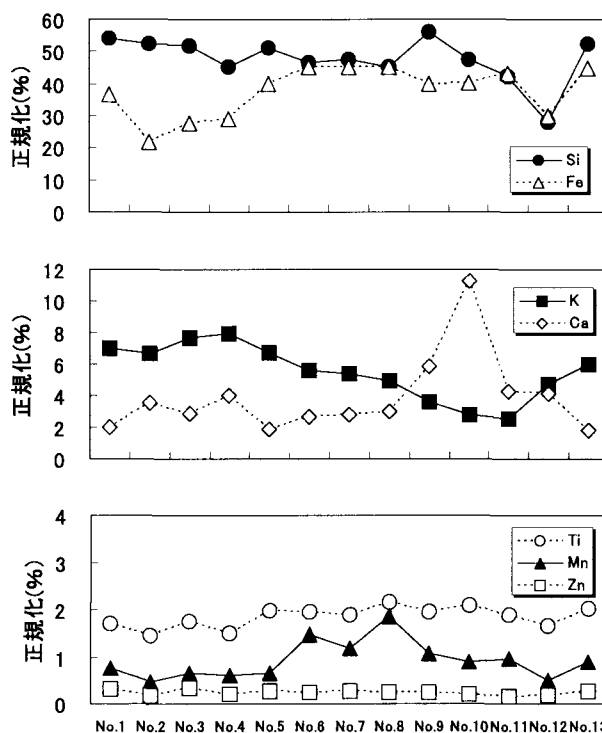


図-6 金属類の現存割合

図-6には主に現存割合の大きい成分を示した。各地点の底泥の組成は主にSi(ケイ素)、Fe(鉄)で構成されていることが分かる。Siは地殻中の主成分で多量に存

表-1 各地点における底泥組成

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	Mean(%)
Si	53.982	52.503	51.764	45.108	51.024	46.587	47.327	45.108	56.201	47.327	42.150	28.100	52.503	47.668
Fe	36.642	21.645	27.729	29.092	39.859	45.056	45.008	45.088	39.901	40.380	43.330	29.899	44.926	37.581
K	7.027	6.641	7.660	7.906	6.746	5.622	5.411	4.954	3.584	2.811	2.530	4.744	6.008	5.511
Ca	1.997	3.558	2.846	4.017	1.836	2.686	2.800	3.007	5.876	11.247	4.292	4.155	1.790	3.854
Ti	1.712	1.466	1.753	1.514	1.975	1.954	1.886	2.166	1.944	2.094	1.879	1.657	2.022	1.848
Mn	0.763	0.477	0.660	0.615	0.645	1.483	1.199	1.876	1.082	0.892	0.957	0.497	0.890	0.926
Zn	0.311	0.179	0.342	0.198	0.276	0.251	0.274	0.258	0.252	0.203	0.166	0.171	0.272	0.243
V	0.258	0.179	0.298	0.229	0.099	0.293	0.273	0.248	0.251	0.256	0.226	0.174	0.065	0.219
Zr	0.187	0.343	0.304	0.271	0.178	0.182	0.196	0.209	0.222	0.172	0.184	0.146	0.157	0.212
Sr	0.086	0.189	0.161	0.224	0.081	0.117	0.118	0.109	0.179	0.298	0.133	0.106		0.150
Y	0.070				0.066		0.062	0.072			0.046		0.061	0.063
Sc	0.027	0.193	0.142	0.193		0.037	0.034	0.017	0.355	0.686	0.230	0.024		0.176
Pd					0.024									0.024
S									1.317			1.399	1.399	1.372
Br												0.154		0.154

在し、降雨などによって溶出する。近年ではダム湖等への沈降により、下流域における Si の減少が食物連鎖に影響を与え、また閉鎖性水域において淡水赤潮を増加させる恐れがあると指摘されている。⁶⁾山間域に位置する桧原湖においてはこの Si の占める割合が最も高いものとなっている。Fe は No. 2～No. 4 及び No. 10 において底泥に含有量する割合が他地点において少ないものとなっている。これらの地点は主要な河川が流入する地点であり、水深も比較的浅い場所である。Fe は主に流域からの土粒子により由来され、微細な粒子に吸着し比較的水深の深い地点まで流送され湖底に沈降し、堆積するものと思われる。また K(カリウム)といったアルカリ金属は北部水域で高い値を有しており、南部水域においては減少する傾向にある。逆に Ca(カルシウム)のアルカリ土類金属は南部水域で高い含有量を示している。これらの傾向は特に流入河川河口部において顕著に現れている。これらの要因は主に地質構造による違いと考えられる。北部流域は主に凝灰岩といった地質であり、また南部流域では火山岩塊で構成されている。これら河川流入部の No. 2～No. 4 及び No. 10 地点においては、この両者の合計割合が 10.2%～14.1%となり他地点においては 6.8%～9.0%と 10%以下と低いことから、流域特性を反映した土粒子由来による供給によるものであると言える。Ti(チタン)は各採取地点において、ほぼ 2%前後で推移しており特に大きな差異は見られていない。このことから Ti は流域の基盤地質によるものであると推察される。Mn(マンガン)は湖中央部から南部水域にかけて高い含有量が認められる。これは Fe と同様な傾向が見られている。これは Fe の生成時における共沈現象によって Mn が沈積していると推察される。また Zn(亜鉛)は人為的な影響の受けやすいものであるが、各地点において 0.25%前後で推移している。以上の結果から Fe や Mn といった重金属類は土粒子の粒径及び吸着に伴う沈降・堆積状況に非常に大きく左右されるものと推察される。また K や

Ca といったアルカリ金属、アルカリ土類金属は流域からの土粒子に強く依存している。

(4) 底泥からの栄養塩溶出特性

湖沼の富栄養化問題は栄養塩の物質収支を明らかにすることである。この過程においては底泥からの窒素やリンの溶出による内部負荷の評価が重要である。そこで底泥の巻き上げによる栄養塩の回帰や溶出といった特性を明らかにする為に溶出試験を行った。

まず図-7 に各地点の特性を代表する底泥の平均径と汚濁度の指標となる有機物割合を示す強熱減量の関係を示す。これより粒径が小さくなるほど強熱減量は増加する傾向が見られる。しかし粒径が大きく、また強熱減量も高い値を有している地点が見られる。この地点は南部水域の No. 12 であり、底泥は黒ぼく土壌であった。ここでは他地点で見られなかった Br(臭素)が検出され、また S(硫黄)含有量が最も高かった地点である。このことから、栄養塩が豊富な雄国沼を源とする雄子沢川が流下する付近では、山林域からの朽木や落ち葉といった有機物を多量に含んだ腐植土で構成されているものと考えられる。従来の調査により粒径に依存する栄養塩特性は粒径の小さなものは大きなものに比べ浮遊土砂濃度が高くそれに伴う栄養塩濃度も高いことが報告されている。⁶⁾底質は水質の蓄積が反映されたかたちで現れることから、各地点における強熱減量と溶出試験による T-N、T-P の関係を図-8 に示す。

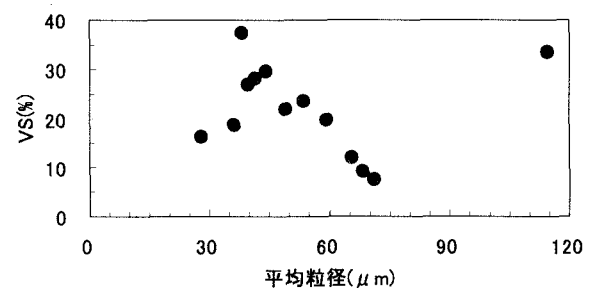


図-7 平均粒径と強熱減量の関係

T-N について見ると強熱減量の増加とともに T-N 溶出量は増加する傾向がみられることから有機物に対する T-N 含有量は非常に強い相関関係にあることが分かる。このことは粒径が小さなものほど栄養塩が吸着していることを示している。また、図-9 に各地点における無機態窒素の濃度を示す。これより $\text{NH}_4\text{-N}$ の成分が非常に卓越していることが認められる。これより水質汚染地点の指標ともなりうる。特に腐葉土が蓄積している No. 12 地点においては特質して高い値を有している。また $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の増減傾向は類似しており、No. 6~No. 8 の湖中央部において高い値を有している。この無機態窒素については硝化・脱窒の現象を実験等から今後より詳細な検討を進める必要がある。また今回 T-N の分析にはペルオキシ二硫酸カリウム分解法を用いたことより、アンモニア性窒素の酸化分解が弱い為に、T-N 濃度に対するアンモニア濃度が高いものとなったが、相対的な傾向は得られている。一方、T-P ではこの強熱減量と有意な関係が見られなかった。リンは水中での存在が不安定であり、夏期の湖底で嫌気状態に移行する還元条件で二価の鉄イオンに還元されるに伴い、底泥に沈降していたリンが再び溶出することが知られている。以下では金属類に着目した有機物と栄養塩溶出及び粒径との関係について述べる。

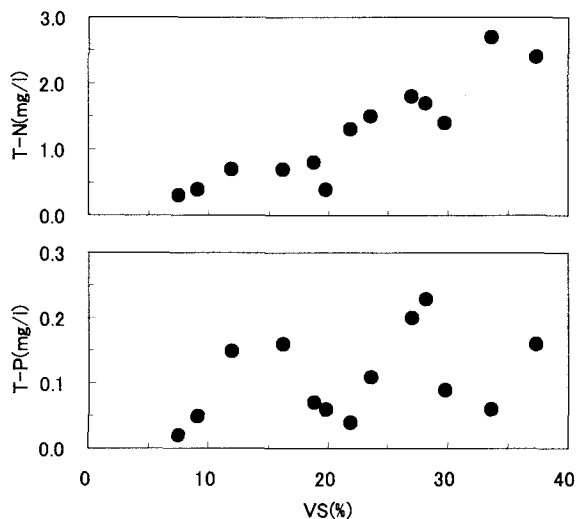


図-8 強熱減量と T-N・T-P 溶出量の関係

(5) 底泥の重金属類と栄養塩溶出特性の関係

T-N、T-P といった栄養塩類は粒径の小さいものほど溶出し易いものであるが、重金属類との関係は不明な点が多い。そこで図-10 に平均粒径と金属現存割合の関係を示す。Si、Ti、Zn は粒径との強い依存関係が見られない。このことから湖内での内部生産や粒子態の形態によらない流域特性に基づいた輸送過程による流域特性を反映しているものと言える。このことは、No. 12 地点での大きな粒径に対し Si 含有量の低い値と高い

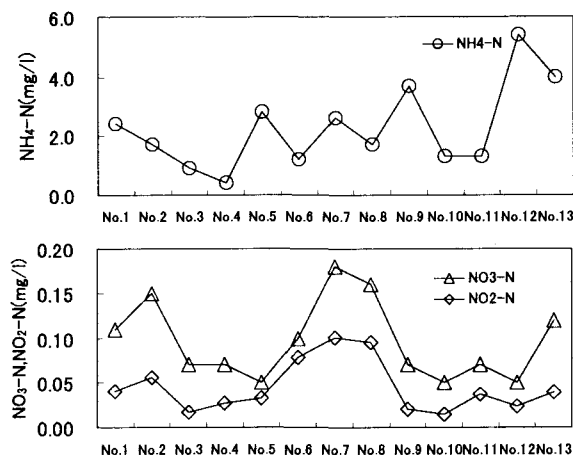


図-9 各地点における無機態窒素の溶出量

栄養塩の関係からも特質していることが分かる。これについては今後より詳細な検討を要する必要がある。また Fe や Mn 等の重金属類は粒径が小さくなるにつれて含有量は比較的高い値を有する傾向にある。特筆すべき点は粒径が $70\mu\text{m}$ の付近で Fe と Mn の増加が見られる。この地点は温泉水が流入する地点であることから温泉水の影響により鉄イオンが土粒子と吸着することにより沈積しているものと考えられる。これに伴う Mn の増加が考えられる。K は一部を除いて粒径の増加に伴い含有量は減少する傾向が見られる。しかし河川流入部付近においては粒径に依存せず含有量の変動が顕著となる。特筆すべきことは Ca である。Ca は粒径が大きくなると、その含有量は増加する傾向にある。以上このことから K、Ca といったアルカリ金属、アルカリ土類金属は流域の特性を含み土粒子由来によるものである。また先に述べた強熱減量と T-P の関係では有意な関係が見られなかったことからここでは鉄との関係を図-11 に示す。これより T-P の溶出は Fe 含有量の増加に伴って溶出する傾向がみられる。これより夏期の湖底では鉄イオンに還元され、底泥からのリンの溶出が強く鉄由来によるものと言える。図-12 に強熱減量と流域からの土粒子由来による K と Ca の合計含有量の関係を示す。流域からの汚濁発生源による栄養塩がある場合、河口部付近においては高濃度の有機物が堆積しているものと思われるが、K と Ca の含有量が高かった河口部付近においては有機物量が少なく、K と Ca の含有量の減少に伴い有機物の増加傾向が見られる。このことから桧原湖においては河川流入部付近では有機物が少なく汚濁の進行はそれほど進んでおらず、湖中央部や入り江付近での水質悪化が懸念される。

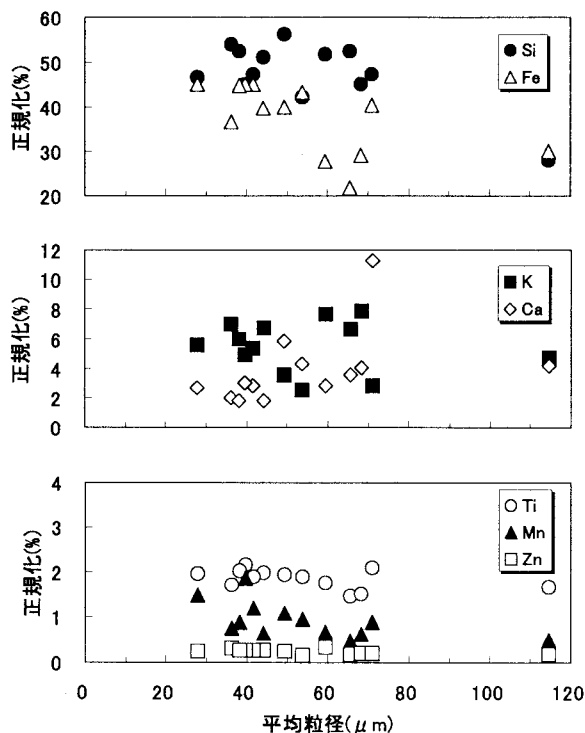


図-10 平均粒径と金属現存割合の関係

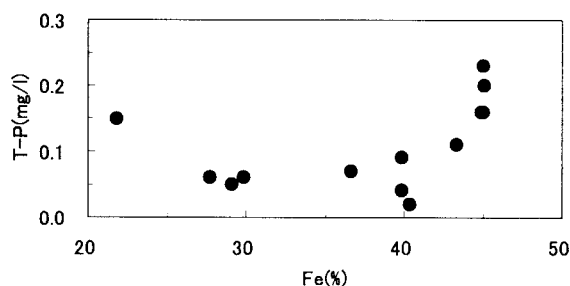


図-11 Fe と T-P 溶出量の関係

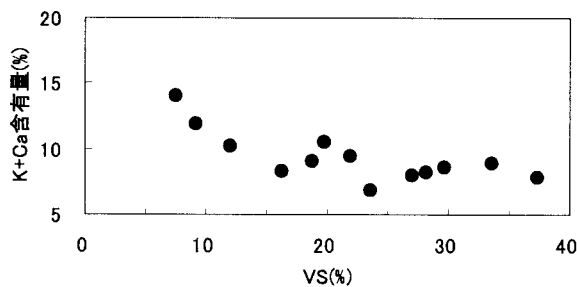


図-12 強熱減量と K・Ca 含有量の関係

6. おわりに

本論文は松原湖において底泥の面的な採取を行い泥質組成の定性及び定量分析から湖内での栄養塩特性を検討した。以下に結論を要約する。

- (1) 水深の深い場所では土粒子の平均粒径が小さくそれに伴い有機物を多量に含んでおり、この有機物

が高い場合、含水比が非常に高い値を有することが分かった。

- (2) 重金属類の底質組成から松原湖においては15種類の元素が確認されK、Caのアルカリ金属、アルカリ土類金属は流域からの土粒子に寄与することを示し、FeやMnの重金属類は湖内での土粒子の粒径及び堆積状態に影響していると考えられる。
- (3) FeやMn等の重金属類は粒径が増大するにつれて概ね含有量は減少する傾向にあるが、Ca含有量は増加する傾向がみられた。
- (4) 夏期における底泥からの栄養塩溶出はT-Nは有機物との相関が高く、T-Pは鉄の溶出に影響される。
- (5) 北部水域ではKの含有量が高く南部水域においてはCaの含有量が卓越している。

謝辞：本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業、日本大学工学部、研究代表者：小野沢元久ならびに、日本工科学術助成金国際総合研究、研究代表者：堀田新太郎の一貫として実施されたものである。また福島県湖未来基金水環境保全活動推進事業及び松原漁協の方々のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大坪・村岡：霞ヶ浦底泥の物性および堆積特性に関する調査と検討，衛生工学研究論文集，第21巻，pp201-209，1985。
- 2) 天野・安田・鈴木：浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング，水工学論文集，第46巻，pp1085-1090，2002。
- 3) 福島・天野・村岡：全国富栄養化湖沼の底質特性について，衛生工学研究論文集，第25巻，pp69-79，1989。
- 4) 湯田・長林：阿武隈川における堆積土砂の粒度分布特性及び栄養塩の検討，土木学会第58回年次学術講演会，pp219-220，2003。
- 5) 小川・長林：山間地河川における汚濁負荷流出特性の検討，土木学会東北支部技術研究発表会，pp184-185，2003。
- 6) 原島 省：河川から海洋に至るN、P、Si輸送の連続性の意義，土木学会環境水理部会研究会用参考資料，pp1-8，2002。
- 7) 日本水環境学会編：日本水環境2，東北編，pp. 52-54，2000。
- 8) 裏磐梯湖沼水質基本構想，福島県，pp. 28-31，1992。
- 9) 猪苗代湖圏域河川整備計画：福島県，p23，2000。
- 10) 岩佐義朗：湖沼工学，山海堂，pp. 288-295，1990。
- 11) 河原・山岡・西原：都市河川の底泥および浮泥の水理・水質学的特性一淀川，神崎川，および神崎川に流入する支川の調査一，第17回衛生工学研究討論会講演論文集，pp34-39，1981。

(2003. 9. 30 受付)