

## 湖沼の生物源粒子が陸源性粒子集団に及ぼす変化と木崎湖の洪水間隔

伊藤 拓馬\*・公文 富士夫\*\*

### Effects of biogenic particle on terrigenous particle population and flooding cycle in Lake Kizaki, Nagano Prefecture, central Japan

Takuma Ito\* and Fujio Kumon\*\*

We have tried to clarify the influence of diatom tests on the grain size distribution of muddy lacustrine sediments measured by laser diffraction size analyzer on the basis of comparison between silica-dissolved sample and silica-undissolved sample of the same sediment. Tested sediments are two cores taken from the center of Lake Kizaki, Nagano Prefecture. Bimodal distribution of grain size is common feature of the sediments. Coarser mode centered around 150–200 microns become more distinct and is increased in ratio after diatom dissolution. This would be explained by the fact that diatom tests of small size are abundant and affect to increase the ratio of finer mode of grain size distribution. In addition, when the tests of diatom tests such as *Cyclotella*, mostly around 10–20 microns in size, are predominant, the peak of the finer mode moves to coarser side after biogenic silica dissolution. On the contrary, when large elongated diatom such as *Fragilaria* and *Synedra*, mostly 60–80 micrometers in length, are abundant, the peak of finer mode moves to finer side after silica dissolution.

On the basis of grain size analysis of diatom-dissolved sediments, finer mode of the sediments from Lake Kizaki seems to be transported by suspension, and coarser mode may deposited from underflow such as density current, because sandy particle can not be transported to the lake center in suspended condition. Sedimentation rate at the lake center is estimated as 0.8 cm/year. Small underflow might take place more than once per year. We can recognize several coarser horizons in the cored sediments which have distinct coarser mode and clear peak of grain size. The interval of coarser horizons corresponds with decades of years, suggesting an average interval of large flood.

**Key words** : grain size analysis, hydraulic environment, hyperpycnal flow, Lake Kizaki, muddy sediment, suspension, turbidity current

#### はじめに

従来、伝統的な方法として細粒堆積物の粒度分析には、比重計法やピペット法が用いられてきた。しかし近年で

は、必要とされる試料が少量でよく、さらに迅速に分析ができるということから、細粒堆積物の粒度分析にはレーザー回折散乱型粒度分析装置が広く用いられている(長島ほか, 2004; Peng et al., 2005)。レーザー回折散乱型粒度分析装置による粒度分析は、測定する試料を構成する粒子を分離・分散させるための化学処理と(Konart and Vandenberghe, 1997)、その中にふくまれる生物源シリカ粒子を取り除くこと(長島ほか, 2004)が非常に重要である。特にレーザー回折散乱型粒度分析装置によって粒度分析する際には、湖沼内や海洋で自生する生物源粒子を取り除かなければ水理条件を反映した本来の粒度分布(すなわち湖沼・

受付: 2006年7月5日 受理: 2007年5月7日

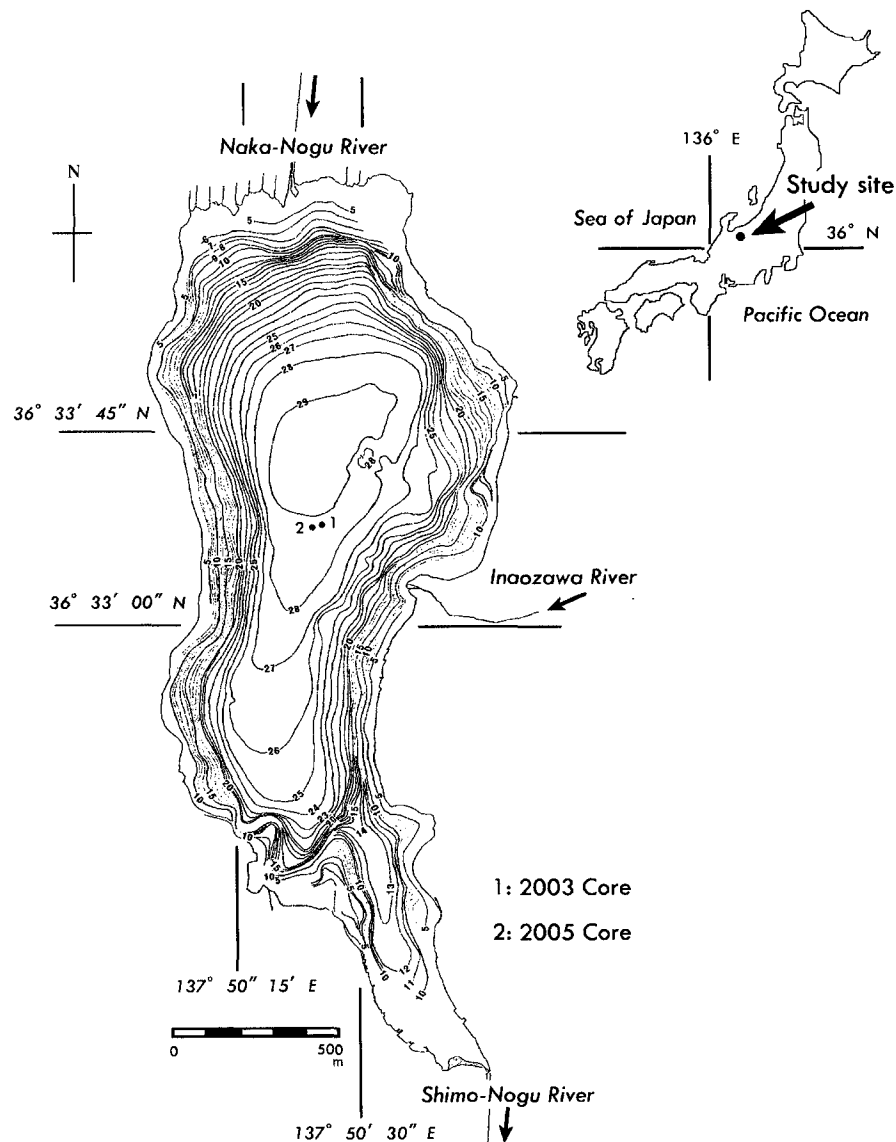
\* 信州大学大学院総合工学系研究科山岳地域環境科学専攻  
Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology,  
Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan

\*\* 信州大学理学部物質循環学科  
Department of Environmental Sciences, Faculty of Science,  
Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan

海洋底堆積物を構成する陸源性粒子の粒子集団)を知ることができない。それは多量に含まれる生物源シリカ粒子(湖沼堆積物では主に珪藻殻)が鉱物粒子と同様に回折・散乱現象を引き起こし、本来の粒度分布に影響を与えるためである。また化学処理が不十分であれば、それは分析における測定誤差の原因になりうることも明らかにされている(Lu and An, 1997)。

現在まで、試料にふくまれる生物源シリカ粒子を取り除いたものの粒度分布から、古環境変遷を解釈する研究がなされてきた(長島ほか, 2004)。しかし、現地性の生物源シ

リカ粒子が、陸源性粒子の粒度分布に対してどのような変化をもたらすのかといった研究は報告されていない。そこで本論文では、木崎湖の湖心部で採取された2本の柱状試料を用いて、生物源シリカ粒子を溶解した試料と未処理試料の2通りの粒度分析の結果を比較し、どのような差異があるのかを検討した。これは生物源シリカ粒子を取り除いた試料の粒度分布に対して、その堆積様式や堆積環境を解釈するためにも重要なことであろう。さらに、生物源シリカ粒子を溶解した試料の鉛直粒度変化から、過去の洪水間隔を見積もることができたので報告する。また、2本の柱



**Fig. 1** Bathymetric map (after Inouchi et al., 1987) and sampling sites of Lake Kizaki. No. 1 : Cored sediments in 2003 (KZ-2003). No. 2 : Cored sediments in 2005 (KZ-2005).

状試料に見出されたタービダイト層を構成する鉱物粒子のモード組成と火山ガラス型の比較からその起源を推定したのでそれも併せて報告したい。

### 木崎湖の概説

長野県大田市北部の糸魚川-静岡構造線が南北に縦走するフォッサマグナ西縁部には、糸魚川-静岡構造線に沿った地形的凹地に、北から青木湖・中綱湖・木崎湖の3つの湖が並び、仁科三湖と呼ばれている。この凹地の西側の山地は、中・古生界の堆積岩や花崗岩・火山岩類で構成されており、その標高は2,000 m程度である。また東側には、新第三系の堆積岩や火山岩類で構成される山地が分布し、その標高は1,200 m程度である(加藤ほか, 1989)。木崎湖は、湖面標高764 m, 湖面積140 ha, 最大水深29.5 mの中栄養湖である(仁科三湖環境保全対策専門委員会, 1983)。木崎湖に流入する主な河川は、仁科三湖を順次につないで、木崎湖北岸に流入する中農具川と新第三系の山中から木崎湖東岸に流入する稲尾沢の2つである。その他はいくつかの小さな沢があるにすぎない。なお、中農具川の流入口付近には小規模な沖積平野が広がり、稲尾沢の流入部には扇状地が形成されている。

### 方 法

#### 1. 試料の採取位置と記載・分取方法

当研究に用いた柱状試料は2本あり、いずれも木崎湖湖心部に相当する位置から採取された(第1図)。なお、2本の柱状試料の詳細は後述するが、各々2003年と2005年に採取されたものである。2003年の試料については、公文ほか(2004, 2005)によってすでに研究されており、柱状試料中に1枚の肉眼観察で識別できる明らかなタービダイト層が見出され、その年代は1961年と決定されている(公文ほか, 2004)。このタービダイト層に対比されるものは、2005年に新たに採取された柱状試料にも認められる。ここで2003年に採取された柱状試料をKZ-2003, 2005年に採取されたものをKZ-2005と便宜的に名づける。KZ-2003は、2003年12月11日に佐竹式採泥器を用いて北緯36°33'17.5" 東経137°50'24"の位置で採取された表層から35 cmまでの柱状試料である(公文ほか, 2004; 2005)。KZ-2005は、2005年9月22日に北緯36°33'17" 東経137°50'21"の位置で、ダイバーによる潜水作業によって採取された表層から64 cmまでの柱状試料である。なお、これは筑波大学の福島武彦教授によって採取された複数の柱状試料のうちの1本である。

採取された柱状試料を研究室にもちかえり、人為的に擾乱しないように注意しながら、最上部の水抜きをした後、

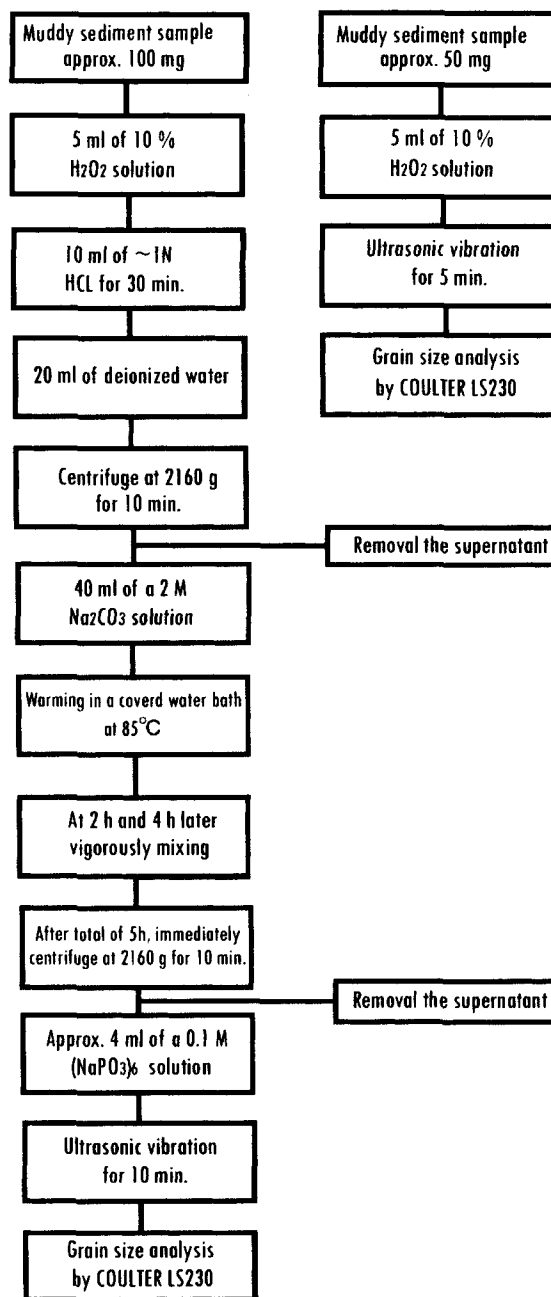


Fig. 2 The flow chart of grain size analysis by COULTER LS230.

直ちに縦方向にテグスで半裁した。半裁された柱状試料は、写真撮影の後、半裁面の層相を肉眼観察により記載した。色調に関しては、新版標準土色帖(1993)に従った。KZ-2003は0.5 cm間隔で試料を分割して、含水率を測定した。乾燥は105°Cで12時間行った。KZ-2005は1 cm間隔

に分割し、同様に乾燥させた。

## 2. 2通りの粒度分析

分割・乾燥させた試料から、生物源シリカ粒子を溶解する試料用としては100 mg前後を分取し、試料をそのまま用いて粒度分析する場合には50 mg程度を分取した。

生物源シリカ粒子の除去については、Mortlock and Froelich (1989)の泥質堆積物中の生物源シリカ定量のための分析方法を応用して、生物源シリカ粒子を完全に除去した(第2図)。その手順の概要は次の通りである。

- 1) 分取した試料に10%の過酸化水素を5 ml加え、およそ24時間放置する。
- 2) 1N塩酸を10 ml加えて30分間放置し、1~2分間超音波振盪で試料を分散させる。
- 3) 20 mlのイオン交換水を加え、遠心分離(3,500回転で10分間)をかけ、上澄み液を捨てる。
- 4) 2M炭酸ナトリウム水溶液を40 ml加え、ボルテックスによる攪拌と超音波振盪をかける。
- 5) 恒温水槽(85°C)に入れて、合計5時間後(2時間後と4時間後に一旦取り出してよく振盪)に取り出し、遠心分離をかけ、上澄み液を捨てる。
- 6) 分散剤として0.1 Mヘキサメタリン酸ナトリウムを4 ml加え、10分間超音波振盪する。

以上の処理の後にBeckman社製COULTER LS230(粒径0.04~2,000 $\mu$ mの粒子範囲を測定可能)を用いて粒度分析を行った。なお、粒度分析をする前に生物源シリカ粒子が完全に溶解しているかを確認するために、各々の試料についてスミアスライドを作製して生物顕微鏡下で粒子観察を行い、生物源シリカ粒子の溶解を確認した(第3図)。

一方、未処理試料については分取した試料に10%の過酸化水素を5 ml加え、ほぼ1日放置する。そして分散剤として0.1Mヘキサメタリン酸ナトリウムを4 ml加え、10分間超音波振盪した後、粒度分析を行った。

## 3. タービダイトの供給源の推定の手法

タービダイトの供給源を推定するために、粒度が相対的に粗粒であるKZ-2005の深度37~38 cm、および深度47~48 cmの試料と、後背地を直接的に反映する堆積物として稲尾沢の河口付近と中農具川の河口付近の堆積物とを用いて、3.5 $\phi$ ~4.0 $\phi$ の構成粒子の組成を検討した。1つの試料について2検査試料を作製した。ここで便宜的に各々の試料をKz47-01, Kz47-02, Kz37-01, Kz37-02, Iz01, Iz02, Ng01, Ng02と名づけることにする。具体的な手法としては、水洗・乾燥させた砂試料からフルイを用いて3.5 $\phi$ ~4.0 $\phi$ の粒子を抽出し、カナダバルサムでスライドガラスに封入後、偏光顕微鏡下で粒子を観察し、鉱物のモード組成を求めて比較した。鉱物種の同定は合計粒子が200個になるまで続した。粒子は石英、長石類、火山ガラス、古期酸性火山岩片、新期酸性火山岩片、有色鉱物、そして不透明鉱物の7種類に区別した。また、火山ガラスを火山ガラス型によって3区分し、それらの割合を三角ダイアグラム上に示した。区別された火山ガラスの型は、無色透明のバブルウォール型火山ガラス(Bb型)、有色のバブルウォール型火山ガラス(Cb型)、そして軽石型(Pm型)の3種類である。

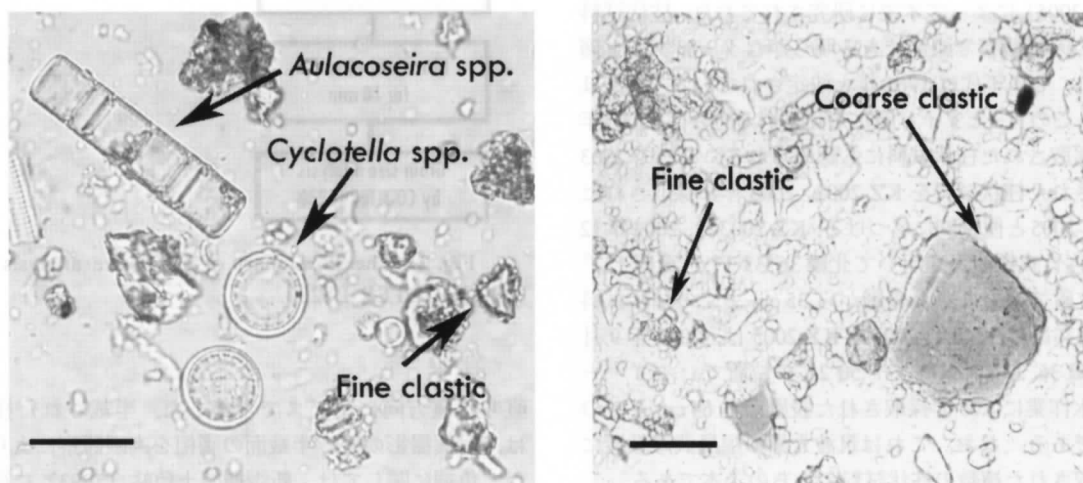


Fig. 3 Photomicrographs of a sample; (left) unprocessed status, (right) processed status. Scale bar is 20 micrometers long. Sample is KZ-2005 core of 30 cm depth.

結 果

1. 柱状試料の層相

2つの柱状試料について肉眼観察から、それぞれ岩相柱状図を作成した(第4図)。両者の層相を比較すると、上位から黒色の層準、黒色縞とやや明るいオリーブ黒色の細かい繰り返す層準、塊状のみかけをもつ層準、タービダイト起源と推定される上方細粒化を示す砂層の4つのユニットに区分することができる。それらは2つの柱状試料に共通

する層相の特徴である。以下、各々の試料についての層相を詳しく示す。

KZ-2003の層相記載はすでに公文ほか(2005)によって報告されている(第4図a)。表面から深度17cmまでは、主に粘土質シルトから構成されている。全体的に黒色であり、部分的(深度5.0~5.5cm, 10.5~11.5cm, 16.0~17.0cm)にやや明色の層をはさむ。この明色層は、スミアスライドによる観察の結果、暗色層と比較して鉱物粒子が多いとされている。深度17.0~23.5cmは、主に粘土質シルトか

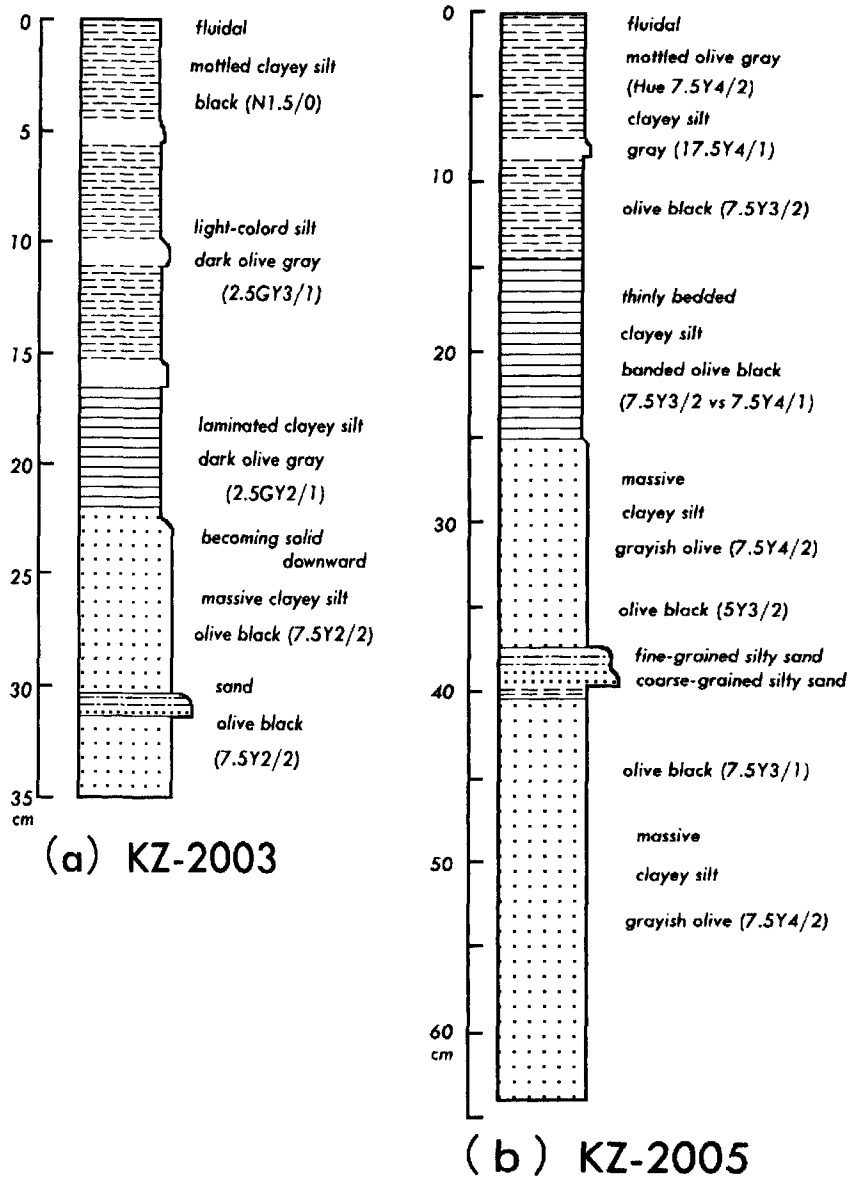


Fig. 4 Lithologic columns of two cored sediments in Lake Kizaki ; a : Core of KZ-2003 (slightly modified after Kumon et al., 2005), b : Core of KZ-2005.

ら構成されており、数 mm の厚さの黒色縞とやや明るいオリブ黒色の縞との細かい繰り返しを示す。深度 23.5~35.0 cm は、粘土質シルトから砂質シルトから構成されている。褐色をおびたオリブ黒色であり、ほぼ均質な見かけをもつ。なお、深度 31.0 cm 付近には厚さ数 mm の砂層がはさまれている。

KZ-2005 の層相は、表層から深度 14.5 cm までは、主に粘土質シルトから構成される。全体的に黒色~オリブ黒色であり、深度 8.0~9.0 cm 付近で一枚の明色の層をはさむ(第 4 図 b)。深度 14.5 cm~25.0 cm は、主に粘土質シルトから構成されており、数 mm の厚さの黒色縞とやや明るいオリブ黒色の縞との細かい繰り返しを示す。深度 25.0~37.0 cm は、粘土質シルトから砂質シルトから構成されている。灰色をおびたオリブ黒色であり、塊状の見かけをもつ。深度 37.0 cm~39.5 cm 付近には、数 cm の厚さの上方細粒化する砂~粗粒シルト層がはさまれている。な

お、この層準には植物遺体が含まれていた。深度 39.5~40.0 cm には、黒色~オリブ黒色の薄いシルト層をはさむ。深度 40.0~64.0 cm は、粘土質シルトから砂質シルトから構成される灰色をおびたオリブ黒色で塊状な構造を示すが、深度 48.0 cm 付近にやや粗粒化する層準が見受けられる。

## 2. 生物源粒子の除去が粒度分析の結果に及ぼす影響

前述した方法に基づいて、同一の試料を 2 通りの方法で粒度分析した。なお KZ-2003 コアでは、全層準にわたる粒度分析結果は得ることができなかった。そのため、全層準の試料がある KZ-2005 を 1 cm 間隔で粒度分析した結果に基本をおいて示し、必要に応じて KZ-2003 の分析結果について言及する。そこで、まず生物源シリカ粒子が粒度分析の結果に及ぼす影響について、1) 生物源粒子の溶解前後の粒度分布の変化、2) 珪藻の優占種と粒度との関係、3) 三角ダイアグラムに基づく粒度組成比の差異、の 3 点について

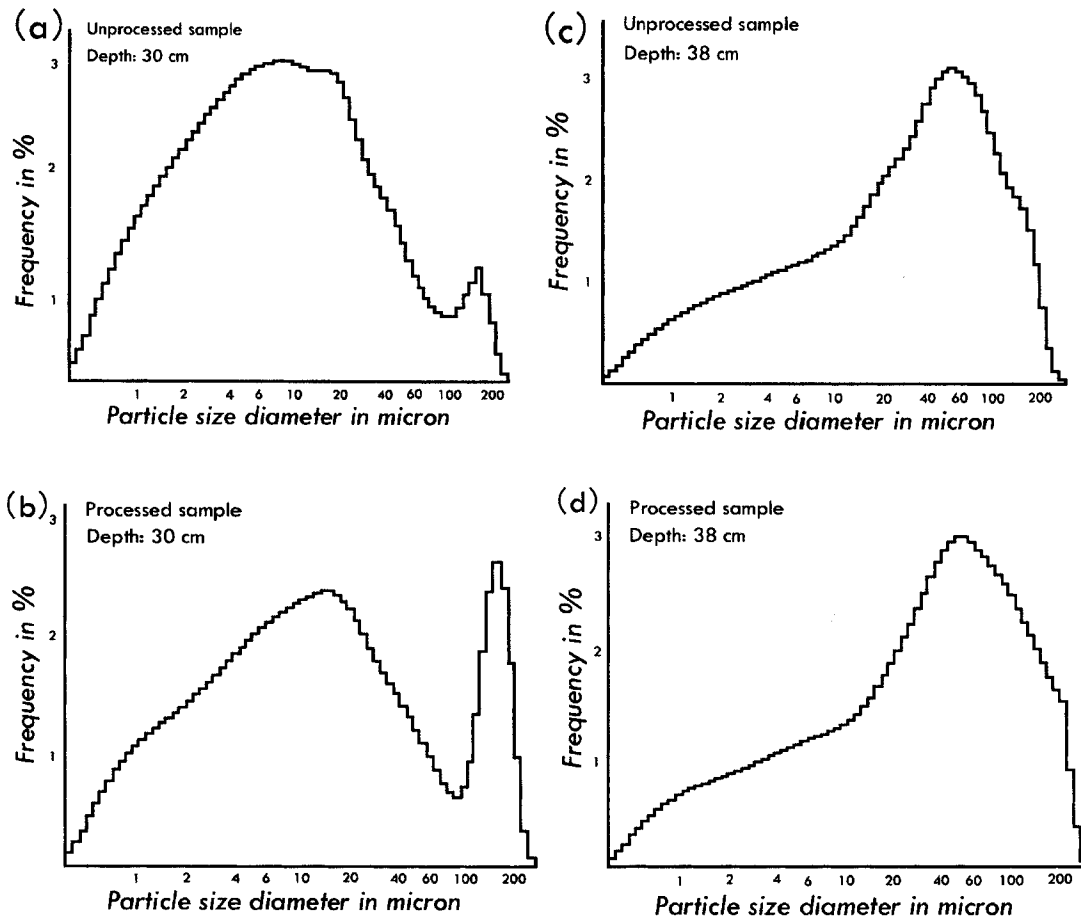


Fig. 5 Changes of grain size distribution ; (a) unprocessed sample. 30 cm depth. (b) processed sample. 30 cm depth. (c) unprocessed sample. 38 cm depth. (d) processed sample. 38 cm depth.

比較検討した。その結果、湖沼堆積物について生物源シリカ粒子を除去することで、陸源性粒子を運搬した水理環境を反映した本来の粒度組成を求めることができることが明らかになった。

### 1) 生物源シリカ粒子の溶解前後の粒度分布の変化

今回採取された木崎湖湖底堆積物の粒度分布の特徴は、ほぼ全層準において双峰性を示すことが挙げられる。ここで双峰性をもつ粒度分布に対して便宜的に細粒側のモードを第1モード、粗粒側のモードを第2モードと呼ぶことにする。生物源シリカ粒子を溶解しない場合とする場合とでは、双峰性を示す粒度分布は、第2モードの量比が相対的に大きくなる(第5図 a, b)。これにほとんど例外はない。ただし、後に述べる混濁流堆積物は単峰性を示し、生物源シリカ粒子の溶解の前後でほとんど粒度分布は変化しない(第5図 c, d)。

### 2) 珪藻の優占種と粒度との関係

一方、第1モードに注目すると生物源シリカ粒子を溶解した後で、第1モードが粗粒側に移動する層準(25~32 cm, 34~34.5 cm)と、細粒側に移動する、またはほとんど変化しない層準(0~24.5 cm, 32.5~33.5 cm)とがあることが明らかになった。

KZ-2003 コアについては、深度にともなって珪藻の優占種が変化することが明らかにされているので(公文ほか, 2004)、珪藻種構成と第1モードの変化との対応関係を検討した。深度0~24.5 cmの層準は、*Synedra* sp.と*Fragilaria* sp.が優占するが、深度24.5 cm以深の層準では、*Cyclotella* sp.が優占する。すなわち、生物源シリカ粒子を溶解した後で第1モードが細粒になる層準、またはほとんど変化がな

い層準では、*Synedra* sp.や*Fragilaria* sp.(生物顕微鏡による観察によれば60~100 $\mu$ mの細長い珪藻)が優占し、粗粒になる層準では、*Cyclotella* sp.(生物顕微鏡による観察によれば20 $\mu$ m以下の円盤状の珪藻)が優占する傾向を示す(第6図)。

### 3) 三角ダイアグラムに基づく組成比の差異

2通りの粒度分析した結果をそれぞれ、砂-シルト-粘土を頂点とする三角ダイアグラム(Shepard, 1954)上で比較した(第7図)。砂-シルト-粘土の粒度区分は、Wentworth(1922)の分類に従った。その結果、未処理試料では、シルトに分布するものや粗粒な層準では砂質シルトやシルト質砂に分布するものが若干認められるが、主に粘土質シルトに分布している。一方、生物源シリカ粒子を溶解した試料では、粘土質シルトに分布するものやシルト質砂に分布するものが認められるが、主に砂質シルトに分布している。つまり、生物源シリカ粒子を溶解させた試料の方が、未処理試料と比較してより粗粒になっており、かつ、粒度の分布範囲がより広がっている傾向がある。

### 3. 粒度分析の結果

KZ-2005 コアについて、生物源シリカ粒子を溶解した試料と、未処理試料の2通りの方法で粒度分析した結果を第8図に示す。ここで平均粒径値は、16, 50, 84パーセントイルの平均をとった値である(Folk and Ward, 1957)。また中央粒径値は、粒度分布の50パーセントイルの値である。ここで、山口ほか(2005)に従い、20~30 $\mu$ mよりも細粒な粒子は浮遊状態から堆積したと考え、粒度分布に対する20 $\mu$ m(5.6 $\phi$ )以下の粒子の割合を浮遊粒子含有率として併せて示す。

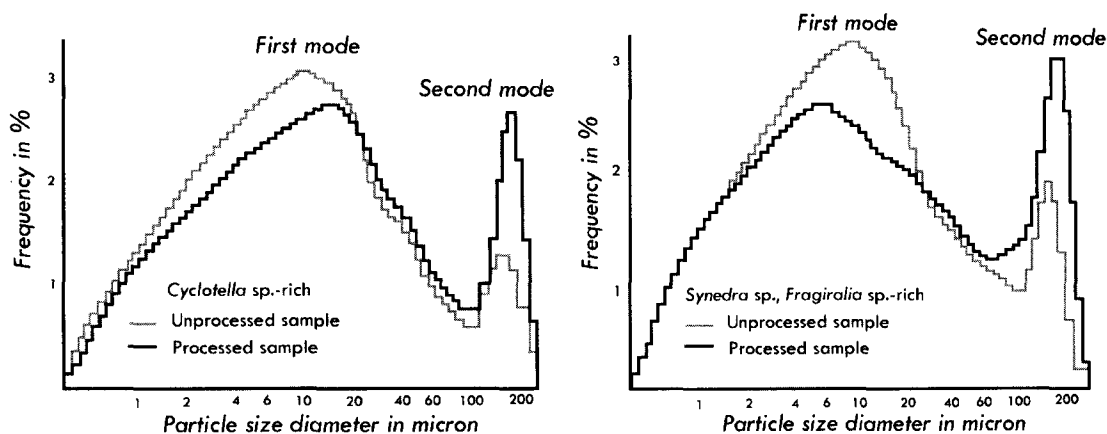


Fig. 6 Relationship between dominant diatom and grain size distribution. Black and gray lines denote grain size distribution of unprocessed and processed sample, respectively. Left and right figures indicate *Cyclotella* sp.-rich and *Synedra* sp. and/or *Fragilaria* sp.-rich horizons, respectively. First mode of left figure shifts toward coarser side and of right figure shifts toward finer side.

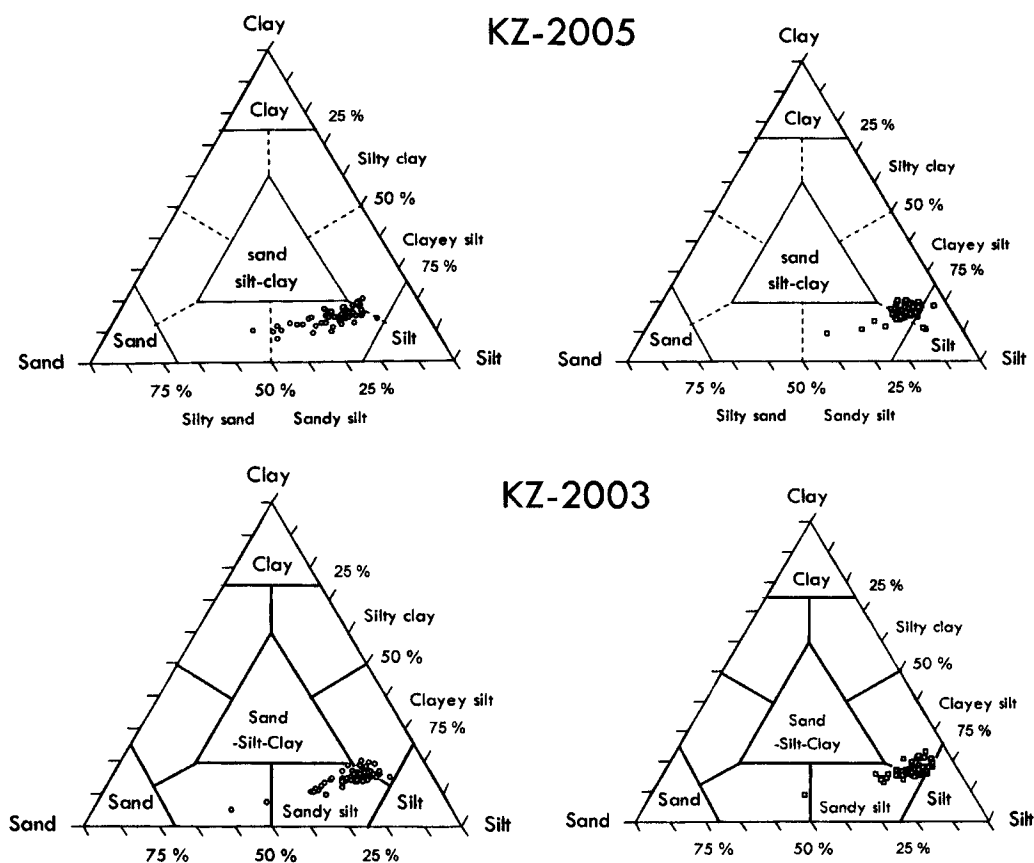


Fig. 7 Comparison of the samples between processed and unprocessed samples.  
Dots : Data of processed sample. Square dots : Data of unprocessed sample.

平均粒径値についてみると、生物源シリカ粒子を溶解した試料については、およそ  $25\sim 50\mu\text{m}$  で変化しているが、間欠的に  $50\sim 120\mu\text{m}$  の突出する層準がいくつかはさまっている。一方、未処理試料では、およそ  $15\sim 25\mu\text{m}$  の範囲で変化を示し、間欠的におよそ  $25\sim 80\mu\text{m}$  とした粒径で突出する層準がはさまる。

また中央粒径値について見ると、生物源シリカ粒子を溶解した試料ではおよそ  $10\sim 15\mu\text{m}$  の範囲で変化し、間欠的に突出した小さなピークが見受けられる。特に、中央粒径値が極大値を示す深度  $38\text{ cm}$  の層準では  $90.5\mu\text{m}$ 、深度  $48\text{ cm}$  の層準では  $30.0\mu\text{m}$  と大きなピークが目立っている。一方、未処理試料では、およそ  $5\sim 10\mu\text{m}$  の範囲で変化を示し、深度  $38\text{ cm}$  では  $56.0\mu\text{m}$  と中央粒径値が最大値に至る。深度  $48\text{ cm}$  にも  $17.2\mu\text{m}$  の突出したピークをもつ。

浮遊粒子含有率については、生物源シリカ粒子を溶解した試料では、主に  $60\sim 70\%$  の範囲で変化しているが、未処理試料では主に  $70\sim 80\%$  の範囲で変化している。つまり、生物源シリカ粒子を溶解した試料の方が、全層準で  $10\%$

程度、浮遊粒子含有率は低い値を示す。これは生物源粒子の多くが浮遊粒子サイズであることに起因すると考えられる。肉眼観察でも粗粒と認識できる深度  $38\text{ cm}$  と  $48\text{ cm}$  の層準では、浮遊粒子含有率は極端に低い。

#### 4. タービダイトの鉱物モード組成と火山ガラス型別の割合

粗粒な層準から分取した試料 Kz47-01, -02, Kz37-01, -02, と周辺河口付近の試料 Iz01, Iz02, Ng01, Ng02 の鉱物モード組成を第 9 図に示す。その結果から、Iz01, Iz02 と Kz47-01, -02, Kz37-01, -02 のモード組成は、長石類と火山ガラスの割合について見れば多少変化に富んでいるものの、新期酸性火山岩片が多いという特徴は一致する。

また、各々の試料における火山ガラス型別の割合を第 10 図に示す。その結果から、稲尾沢河口付近の堆積物と木崎湖湖心部のものは、Cb 型が約  $54\sim 59\%$  と多いという点で類似している。一方、中農具川河口付近のものは、Bb 型が約  $67\%$  と多い。



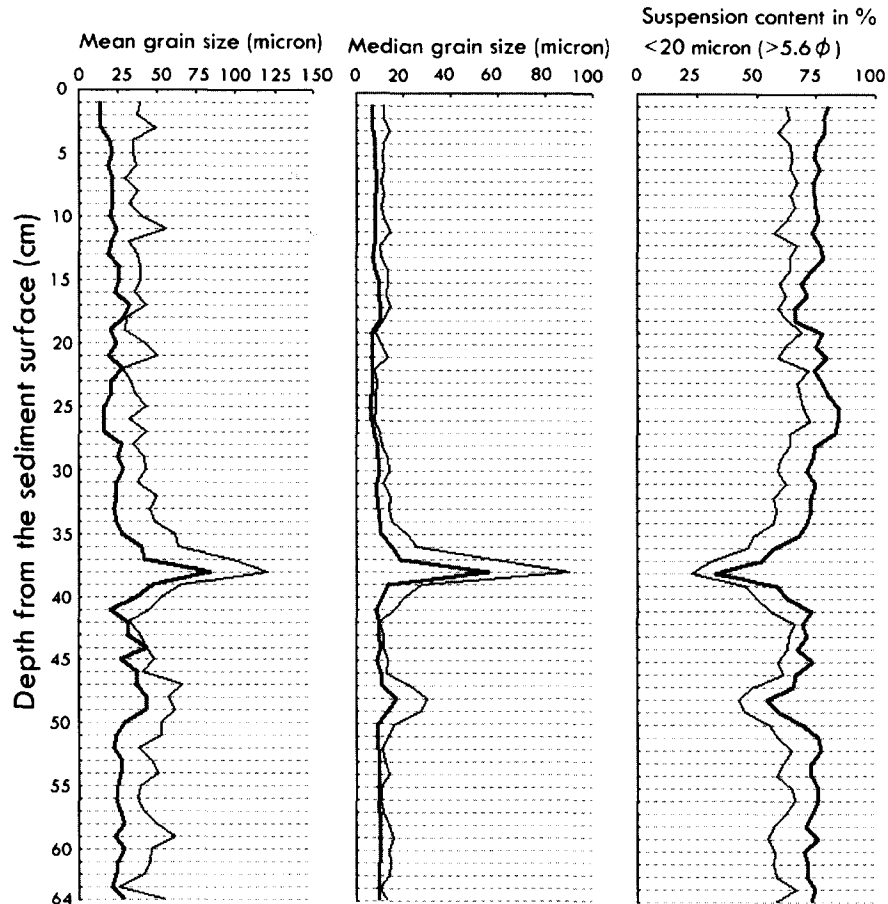


Fig. 8 Vertical profiles of mean grain size, median grain size and suspension content of Kz-2005. Gothic and fine lines indicate data of unprocessed and processed sample, respectively.

## 考 察

### 1. 生物源シリカ粒子を溶解する効果

湖沼堆積物中の生物源シリカ粒子が粒度特性に与える影響と、それを溶解させることの効果を考察する。

生物源シリカ粒子の溶解前後の粒度分布の変化(第5, 6図)についてみると、双峰性を示す試料においては、生物源シリカ粒子の溶解後で全層準において第2モードの粒度組成比が相対的に大きくなることが示された。この理由は、主に第1モードを構成していた生物源シリカ粒子、特に珪藻殻が完全に溶解したことで、相対的に第2モードの比率が大きくなったためと考えられる。一方、深度32 cm (KZ-2003) や深度38 cm (KZ-2005) 付近の粗粒な層準は単峰性の粒度分布を示すが、生物源シリカ粒子の溶解前後で粒度分布にほとんど差異がない。これらの粗粒な層準には珪藻殻がほとんど含まれていないこと(公文ほか, 2004)

も上述の推定を支持する。

珪藻の優占種と粒度との関係では、生物源シリカ粒子を溶解した後で第1モードが細粒になる層準、またはほとんど変化しない層準については *Synedra* sp. や *Fragilaria* sp. が優占し、粗粒になる層準では *Cyclotella* sp. が優占することが明らかになった。この結果は、堆積物に含まれる珪藻の種構成も粒度特性を変化させうることを示している。

三角ダイアグラム上での比較(第7図)では、生物源シリカ粒子を溶解させた試料の方が、未処理試料に比して、より粗粒になっており、かつ、粒度の分布範囲がより広がることが明らかになった。それは、未処理試料に多く含まれる湖沼内で自生した珪藻殻は第1モードに属する細粒な粒子であること、また粒径がほぼ等しいという性質を持つことで、陸源性の粒子から構成される粒子母集団に影響を与え、より細粒でかつ粒径がそろっているようにみえることを示している。生物源シリカ粒子を溶解させた試料が、

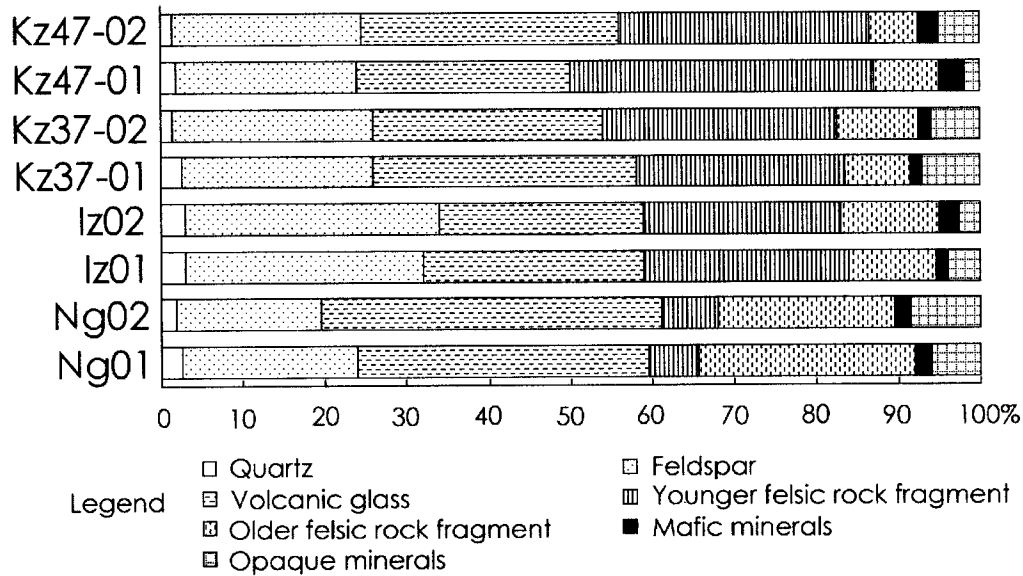


Fig. 9 Comparison of mineral composition in the very fine-grained sands ( $3.5-4.0\phi$ ) from Lake Kizaki and its distributaries; Kz-47: sample of 47-48 cm depth of Core Kz-2005., Kz-37: sample of 37-38 cm depth of Core KZ-2005., Iz: sediment sampled from Inaozawa, Ng: sediment sampled from Naka-Nogu River.

三角ダイアグラム上で広い分布範囲を示し、粗粒化するという事実は、陸源性の粒子が運搬に寄与した水理環境に対応した多様性のある粒度組成をもっているということを示している。したがって、生物源シリカ粒子を取り除くことで、湖沼周辺から運搬された陸源性碎屑粒子の母集団の本来の多様性ある粒度組成と捉えることができる。

なお、第8図に示したように、粒度分布の平均粒径値と中央粒径値についてみても、生物源シリカ粒子を溶解した試料の方が全層準で粗粒になり、かつ粒度変化が顕著になることは明らかである。

## 2. 粒度分析に基づく水理環境の検討

木崎湖の表層堆積物の粒度分布は公文・井出(1999)によって明らかにされている(Kumon, 2001)。その結果に基づけば、今回の試料採取地点にあたる湖心部は、中央粒径で $8\phi$ 以上( $4\sim 2\mu\text{m}$ )の堆積物の分布域であり、懸濁運搬を主とした堆積作用が起きていると考えられている(公文・井出, 1999)。その分析方法は比重計法であったため、粒径ごとの細かな粒度分布を今回の研究結果のように明らかにすることはできていない。しかし、今回の粒度分析の結果が示す双峰性の粒度分布のうち、細粒側の第1モードは $6\sim 20\mu\text{m}$ にピークをもつこと、および、第1モードが堆積物の主体を占めることからみて、木崎湖湖心部の堆積物が懸濁運搬を主体とする堆積物である可能性が高い。

一方、 $150\sim 200\mu\text{m}$ にピークをもつ第2モードの堆積物を懸濁運搬による堆積物と見なすことはできない。なぜな

らば、木崎湖で観察される湖流や表層流の平均流速は $1\sim 6\text{ cm/sec}$ 程度(ただし、稲尾沢河口の最大流速は $20\text{ cm/sec}$ 、中農具川河口の最大流速は $15\text{ cm/sec}$ )であるため(Arai, 2001)、河口や沿岸部から供給された細粒～極細粒砂でさえ、その近辺で速やかに沈積してしまっており、湖心部には運ばれないと考えられるからである。他の多くの湖と同様に、木崎湖の底質分布も運搬過程を反映して、砂質堆積物の分布は流入河川の河口部の近辺と水深 $10\text{ m}$ 以浅の沿岸部に限られている(公文・井出, 1999)。

湖の沖合域に砂質堆積物を運搬する有力な過程の1つは、砂質堆積物が水と混合した密度流となって湖底を流下する底層流であろう。Strum and Matter (1978)は、スイスのブレンツ湖の研究をもとに、河川から湖への3つの流入形態を区別し、高密度の混濁水が重力にしたがって底層を流下する運搬作用(底層流)の役割を大きく評価した。木崎湖は、ブレンツ湖と類似した湖底地形や流入河川をもっており、河川からの洪水を起源とする底層流が形成される可能性は高い。

洪水を起源とする底層流があるとすれば、高密度で粒子を支持する流体が淡水という特徴をもつため、それはハイパーピクナル流と考えられる(Kneller, 1995; Mulder et al., 2001)。ハイパーピクナル流は、洪水や季節的な要因によって起こりうるとされている(Mulder and Syvitski, 1995)。日本では、夏季の初めに梅雨前線の停滞により多くの降水量がもたらされ、しばしば集中豪雨も発生する。また夏季の

終わりにから秋季の初めにかけては、しばしば台風が襲来し、多量の降水によって洪水を発生させる。これが毎年繰り返されているので、ハイパーピクナル流は毎年のように発生していると考えられる。さらに、木崎湖は淡水湖であるため、河川水との間に大きな密度差がないこともまた、それが発生しやすい一因となるだろう。

一方、第1モードを構成する細粒堆積物は、春先の雪融けにともなう混濁水や強度の大きい降水にともなう濁り水、および波浪による湖岸浸食の産物として湖に供給され、懸濁運搬によって湖盆中心まで運ばれ、沈積したものと考えられる。これらの堆積作用は1年という単位で見れば定常的に進行しているものである。前述したように、木崎湖湖心部の粒度分布が、ほぼ例外なく双峰性を示すということは2つの堆積作用がほぼ同時に平行して進行しているという推察を支持する。ハイパーピクナル流起源の粗粒粒子集団（第2モードを構成する集団）と、定常的に沈積する懸濁起源の細粒粒子集団（第1モードを構成する集団）とを別々に分析できたならば、それぞれは別の正規分布として測定されるはずである。しかし、今回の粒度分析では、0.5 cm または 1 cm を単位として分取した試料を用いて粒度分析を行っているため、多くの場合に混濁起源の細粒粒子母集団とハイパーピクナル流起源の粗粒粒子母集団とを混合して測定している可能性が高い。それが粒度分析において双峰性をもつ原因であろう。

木崎湖湖心部においては、主体となる懸濁による沈積は定常的に起こっており、間欠的なハイパーピクナル流による運搬は、ほぼ毎年発生する季節的なイベントに対応して発生していると考えられる。

さて、KZ-2005 コアの深度 38 cm 付近にある砂層に注目すると、1) 中粒砂～粗粒シルトに正級化している、2) 単峰性の粒度分布を示す、という特徴があり、規模の大きなハイパーピクナル流堆積物（タービダイトまたはハイパーピクナル流）と考えられる。公文ほか（2004）は、1983年に採取・記載された柱状試料との比較や、1984年に採取された試料に基づく<sup>137</sup>Cs年代測定結果との比較から、この深度の砂質堆積物が1961年6月28～29日に梅雨末期に発生した大洪水（信州から北関東にかけて昭和36年に起きた「36災害」に相当）による堆積物と結論づけた。その堆積物は有機物に乏しい反面、高いC/N比をもつことも陸上に起源をもつ洪水堆積物であることを示唆している（公文ほか、2004）。その年代に基づく、KZ-2005 コアの1961年以降の堆積速度は、0.8 cm/年程度となる。この堆積速度と粒度分析試料の分取間隔との関係からみると、細粒砂を少量運搬するようなハイパーピクナル流は毎年のように発生していると考えられる。これは梅雨時の集中豪雨、台風の豪雨などが主な原因であろう。

さらに、KZ-2005 コアの深度 3 cm, 11 cm, 21 cm, 27 cm, 32 cm, 48 cm, 54 cm, 59 cm, 64 cm には大きな中央粒径値と平均粒径値がみられ、間欠的にやや粗粒な層準がはさまれている。堆積速度に基づけば、約10～20年に1度程度の割合で粗粒な層準がはさまれることになる。この層準の粒度分布では、第2モードの比率が高くなっている。中央粒径値の変化に注目すれば、毎年のように起きている「小規模な洪水」と、間欠的に起こる「中規模な洪水」、そして深度38 cmの「36災害」に相当する「大規模な洪水」とに区別できる。また、Kumon（2001）で報告されたような木崎湖湖底堆積物に間欠的に挟在する粗粒シルト～砂層の産出頻度は、約100～200年に1度程度であり、大規模な洪水の発生間隔を示している可能性が高い。

### 3. タービダイトの供給源の推定

稲尾沢河口付近、中農具川河口付近、および木崎湖湖心部の堆積物における鉱物モード組成の比較（第9図）に基づけば、稲尾沢河口付近の試料と木崎湖湖心部の粗粒堆積物では、長石類と火山ガラスの割合に多少のばらつきがあるものの、新期酸性火山岩片が多いという共通性がある。これは、稲尾沢の後背地には新第三系以降の年代の若い地層が分布すること（加藤ほか、1989）を反映していると考えられる。さらに、それぞれの試料の火山ガラス型別の割合についてみれば（第10図）、稲尾沢河口付近の堆積物と木崎湖湖心部のものは、Cb型が約54～59%と多く、中農具川河口付近のそれは、Bb型が約67%と多い。これらの

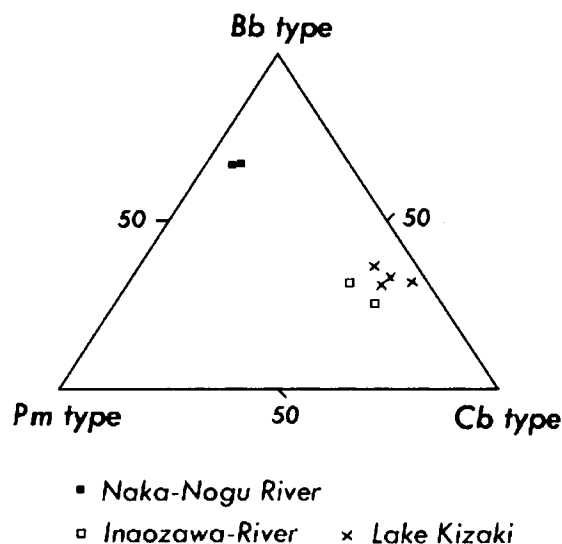


Fig. 10 Triangular diagram for the volcanic glasses from the cored sediment (Kz-2005) and river sediments in Inaozawa River and Naka-Nogu River. Bb : Colorless bubble wall type, Cb : Colored bubble wall type, Pm : Pumice type.

事実から、木崎湖湖心部のタービダイト（ハイパーピクナイト）の供給起源は稲尾沢と推定できる。

### ま と め

木崎湖湖心部から 2003 年と 2005 年に採取した、各々 35 cm 長と 64 cm 長の柱状試料に対して生物源シリカ粒子を溶解させて粒度分析を行い、以下に示す結果を得ることができた。

1. レーザー回折散乱型粒度分析装置による粒度分析を用いて、木崎湖湖心部から採取したコア試料に対して生物源粒子を溶解させた試料と未処理試料とに対して 2 通りの粒度分析を行った。
2. 木崎湖湖心部における堆積物の大部分は双峰性の粒度分布をもち、生物源シリカ粒子を溶解した試料では粗粒側のモードの比率が大きくなり、平均粒径や中央粒径も大きくなることが明らかになった。
3. 生物源シリカ粒子（湖沼では主に珪藻殻）は、ほぼ等しい粒径をもつために、陸源性粒子だけから構成される粒度分布の淘汰度を良くすることと、その種構成によっては第 1 モードを細粒側や粗粒側に移動させることが明らかになった。
4. 木崎湖湖心部における陸源性粒子の粒度分布が、ほぼ全層準で双峰性を示すことからみて、粒度分布の主体をなす細粒粒子の懸濁による沈積は定常的に起こっており、一方、底層流による粗粒粒子の小規模な運搬も、ほぼ毎年起こる季節的なイベントに対応して発生していると考えられる。
5. 陸源性粒子だけからなる粒度分布の鉛直変化からみて、小規模な底層流は毎年のように発生し、約 10~20 年に 1 度の頻度で中規模なタービダイトが発生していると推定される。
6. 砂粒におけるモード組成と火山ガラス型の類似性を比較することによって、中~大規模なタービダイト（ハイパーピクナイト）の起源を稲尾沢と推定した。

### 謝 辞

信州大学大学院の田原敬治氏と角田尚子氏には、本研究に関して有益な議論をしていただきお世話になった。また信州大学理学部の古環境変動研究室の方々には試料採取と分取の協力を頂いた。さらに 2 名の匿名査読者の適切なコメントにより本稿は改善された。以上の方々には深く感謝する。

### 文 献

- Arai, T., 2001 : c. Water Motions. In Saijo, Y. and Hayashi, H., eds., *Lake Kizaki—Limnology and Ecology of a Japanese Lake—*, Backhuys Publishers, Leiden, 74–78.
- Folk, D.L. and Ward, W., 1957 : Brazos river bar ; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**, 3–26.
- 井内美郎・山崎晴雄・下川浩一, 1987 : 長野県青木湖の音波探査結果（予報）。日本第四紀学会講演要旨集, no. 17, 116–117.
- 加藤貞一・斎藤岳生・三村弘二・滝沢文教, 1989 : 大町地域の地質。地域地質研究報告（5 万分の一の地質図幅），地質調査所, 111 p.
- Kneller, B. and Branney, M.J., 1995 : Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands. *Sedimentology*, **42**, 607–616.
- Konart, M. and Vandenberghe, J., 1997 : Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis : a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, **44**, 523–535.
- Kumon, F., 2001 : Paleolimnological studies. In Saijo, Y. and Hayashi, H., eds., *Lake Kizaki—Limnology and Ecology of a Japanese Lake—*, Backhuys Publishers, Leiden, 55–62.
- 公文富士夫・井出泰之, 1999 : 長野県木崎湖の湖底堆積物とそれに記録された最新期の環境変動。日本地質学会第 106 年学術大会講演要旨, 153–153.
- 公文富士夫・金丸絹代・田原敬治・角田尚子・山本雅道・林秀剛, 2005 : 湖底堆積物中の有機炭素含有率と湖水中の生物生産性、および気象要素との関係—長野県、木崎湖における 21 年間の湖沼観測からの検証—。地質学雑誌, **111**, 599–609.
- 公文富士夫・田原敬治・山本雅道, 2004 : 信州、木崎湖における最近の堆積物の年代と堆積速度。山地水環境教育研究センター研報, no. 3, 77–84.
- Lu, H.Y. and An, Z.S., 1997 : The influence of pre-treatment to grain-size analysis results of loess. *Chinese Science Bulletin*, **42**, 2535–2538.
- Mortlock, R.M. and Froelich, P.N., 1989 : A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Research*, **36**, 1415–1426.
- Mulder, T., Migeon, S., Savoye, B. and Faugeres, J.-C., 2001 : Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean : A record of deposits from flood-generated turbidity currents? *Geo-Marine Letters*, **21**, 86–93.
- Mulder, T. and Syvitski, J.P.M., 1995 : Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. *Journal of Geology*, **103**, 285–299.
- 長島佳菜・多田隆治・松井裕之, 2004 : 過去 14 万年間のアジアモンスーン・偏西風変動—日本海堆積物中の黄砂粒径・含有量からの復元—。第四紀研究, **43**, 85–97.
- 仁科三湖環境保全対策専門委員会, 1983 : 仁科三湖の環境保全をめざして。仁科三湖環境保全対策専門委員会報告, 157 p.

- Peng, Y., Xiao, J., Nakamura, T., Liu, B. and Inouchi, Y., 2005 : Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China. *Earth and Planetary Science Letters*, **233**, 467-479.
- Shepard, F.P., 1954 : Nomenclature based on sand-sily-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, **24**, 151-158.
- Strum, M. and Matter, A., 1978 : Turbidites and varves in Lake Brienz (Switzerland) : deposition of clastic detritus by density currents. *IAS Spec. Publ.*, no. 2, 147-168.
- Wentworth, C.K., 1922 : A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, **30**, 377-392.
- 山口正秋・須貝俊彦・藤原 治・大森博雄・鎌滝孝信・杉山雄一, 2005 : ボーリングコアの粒度組成と堆積速度からみた木曾川デルタの微地形と堆積過程. *第四紀研究*, **44**, 37-44.

### 湖沼の生物源粒子が陸源性粒子集団に及ぼす変化と木崎湖の洪水間隔

伊藤 拓馬・公文 富士夫, 2007. 堆積学研究, No. 65, 15-27

**Ito T. and Kumon F. : Effects of biogenic particle on terrigenous particle population and flooding cycle in Lake Kizaki, Nagano Prefecture, central Japan**  
*Jour. Sed. Soc. Japan*, No. 65, 15-27

レーザー回折散乱型粒度分析装置を用いた粒度分析に関して、生物源シリカ粒子を溶解させたものと溶解させないものとを比較した。長野県の木崎湖湖心部で採取した2本のコアについて研究した。粒度分布は双峰性を示す特徴があり、生物源シリカ粒子溶解後には粗粒側のモードが明瞭になり、その比率も増加する。それは細粒側のモードに多くの生物源シリカ粒子が存在するためである。また *Cyclotella* が優占する層準では、生物源シリカ粒子の溶解後に、細粒側のモードはより粗粒側に移動し、反対に *Fragilaria* や *Synedra* が優占する層準ではより細粒側に移動する。

木崎湖の粒度分布の細粒側のモードは浮遊状態で、粗粒側のモードは底層流によって堆積したと考えられる。砂質粒子は密度流以外では湖心部まで至らないためである。小規模な底層流は1年に1回程度の頻度で発生している。粗粒側のモードが卓越する層準は10~20年ごとにあり、大きな洪水間隔を示唆する。