

バイカル湖集水域における過去 25 万年間の植生変遷

尾田武文¹⁾・箕浦幸治²⁾・藤村千鶴²⁾・中村俊夫¹⁾・河合崇欣³⁾

¹⁾ 名古屋大学年代測定総合研究センター 〒464-0814 名古屋市千種区不老町

²⁾ 東北大学理学部地圏環境科学科 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉

³⁾ 国立環境研究所化学環境部 〒305-0053 つくば市小野川 16-2

はじめに

バイカル湖湖底泥堆積物試料を用いたユーラシア大陸内陸部における古環境変動の解析は、これまで主として生物源シリカ含有量あるいは珪藻含有量で評価される湖内生産量の増減と氷期・間氷期周期の対応関係に関する研究がなされてきた⁽¹⁻²⁾。Williams *et al.*⁽³⁾ は、BDP96-Hole 2 コアを用いた生物源シリカ含有量の高分解時系列解析を試み、過去 250 万年間の湖内生産変動の履歴を明らかにし、この湖内生産が地球軌道要素と深く関わっていることを示した。その他、粘土鉱物の X 線反射強度の測定や安定同位体の測定などにより、バイカル湖とその集水域における古環境復元の試みも数多くなされている⁽⁴⁻⁷⁾。一方、花粉学的研究による古環境変動の解明が期待されているが、これまで 100m コア BDP93 に基づく 80 万年以降の大まかな植生変遷の解明⁽⁸⁻⁹⁾ の他、高分解能時系列情報としての植生変遷史は Bezrukova⁽¹⁰⁾、尾田ほか⁽¹¹⁾、三好ほか⁽¹²⁾ などによる最終氷期以降の花粉分析による研究にとどまっている。こうした状況を鑑み、本稿では、詳細な花粉化石分析による後期更新世以降の陸上植生の変遷の復元を試み、この結果に堆積学的情報を加えて、過去 25 万年間にバイカル湖集水域の環境変動が及ぼした湖内生産への影響についても考察を行った。

試料

本研究では、アカデミシャンリッジ (53°41'52"N, 108°21'06"E, 水深 320m) で採取した VER96-2 St. 3 重力式コア (試料長 473.5cm) と VER96-2 St. 3 ピストンコア (試料長 473.5cm) を用いた⁽¹³⁾ (Fig. 1)。重力式コア試料に採取時の堆積攪乱は認められなかったが、ピストンコア試料では深度 0-8cm 及び 463-473.5cm において採取時の堆積攪乱が認められた。本稿では Minoura *et al.*⁽¹³⁾ に従い岩相および含水率による対比から、重力式コア試料で深度 455.5cm とピストンコア試料で深

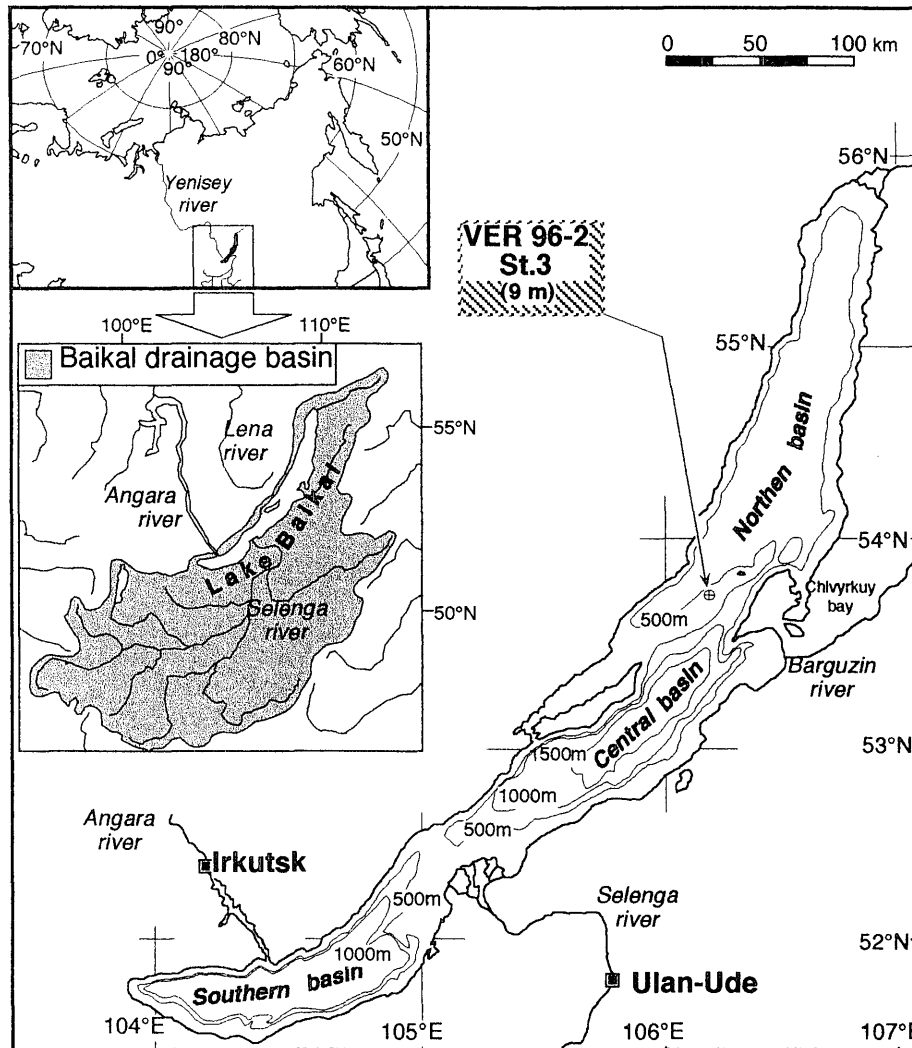


Fig. 1: Map of Lake Baikal showing the location of the core used in this study (VER96/2 St. 3).

Depth (cm)	TN (wt %)	TOC (wt %)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Analytical age (yr. B.P.)	Corrected age (yr. B.P.)	1σ error (yr.)
9	0.19	1.64	-28.08	3,590	3,520	80
29	0.13	0.99	-26.88	4,590	4,550	90
49	0.26	2.36	-28.64	6,480	6,380	90
69	0.19	1.90	-28.15	9,260	9,150	100
89	0.15	1.33	-28.53	11,800	11,640	130
107	0.10	0.84	-28.83	14,630	14,410	140
119	0.05	0.33	-21.33	20,770	21,200	230
159	0.05	0.28	-21.78	22,540	23,010	240
226.5	0.07	0.45	-22.82	29,770	30,540	490
296.5	0.07	0.46	-22.80	33,260	34,470	690
326.5	0.08	0.37	-22.77	33,810	35,140	760

Table 1: AMS radiocarbon ages for the Academician ridge core (VER96/2 St. 3). $\delta^{13}\text{C}$ correction according to Nakamura (1994) and Oda (1994).

度 41cm の層準を同一層準としてこれら 2 つのコアを連結し、堆積攪乱層を除いた層厚 877.5cm の一連の堆積層として解析を行った(Fig. 2)。堆積物相は、下位より葉理の発達する粘土質シルト (深度 877.5-869.5cm)、葉理の発達する珪藻質シルト (深度 869.5-799.5cm)、葉理の発達する粘土質シルト (深度 799.5-658cm)、葉理の発達する珪藻質シルト (深度 658-588cm)、葉理の発達する粘土質シルト (深度 588-549.5cm)、葉理の発達する珪藻質シルト (深度 549.5-502.5cm)、葉理の発達する粘土質シルト (深度 502.5-491.5cm)、葉理の発達する珪藻質シルト (深度 491.5-482.5cm)、葉理の発達する粘土質シルト (深度 482.5-472.5cm)、葉理の発達する珪藻質シルト (深度 472.5-446.5cm)、葉理の発達する粘土質シルト (深度 446.5-312.5cm)、塊状粘土質シルト (深度 312.5-291.5cm)、葉理の発達する粘土質シルト (深度 291.5-226.5cm)、塊状粘土質シルト (深度 226.5-108cm)、塊状シルト (深度 108-92cm)、葉理の発達するシルト (深度 92-54cm)、および葉理の発達する珪藻質シルト (深度 54-0cm) であった。また、深度 742.8-742.3cm および深度 658-657cm の層準で細粒砂を含むシルト層が挟在する。

分析方法

柱状堆積物試料から 2 cm 間隔で分析試料を採取し、花粉分析と生物源シリカ含有量および粒度分析を行った。深度 326.5cm、296.5 cm、226.5 cm、159 cm、119 cm、107 cm、89 cm、69 cm、49cm、29cm、9cm の 11 の層準から得た試料については、有機炭素を抽出し、AMS 炭素同位体年代の測定を行った。

AMS¹⁴C 年代測定

測定変量の時系列変動を明らかにする目的で、以下の手順で加速器質量分析計による炭素同位体年代測定を行った (Table 1)。まず、試料を 80°C に保った塩酸 (1.2M) で 2 時間反応させ炭酸塩を除去し、その後水洗した。乾燥させたこの試料 (0.1~0.4g 程度) をバイコール管に 500mg の CuO とともに封入し真空引きした後、電気炉にて 950°C で 3 時間加熱して試料中の有機炭素を CO₂ 化した。発生した CO₂ から水分と硫酸化物の除去を、ガラスライン中で融点の異なる 3 つの寒剤 (液体窒素、エタノール、ペンタン) を用いて施した。この精製された CO₂ を粉末状鉄触媒と水素ガスとともにバイコール管に封入し、電気炉にて 650°C で 5-6 時間加熱しグラファイト還元処理を施した。このようにグラファイト化した堆積物中の有機炭素について名古屋大学年代測定総合研究センターのタンデム加速器質量分析計を用いて

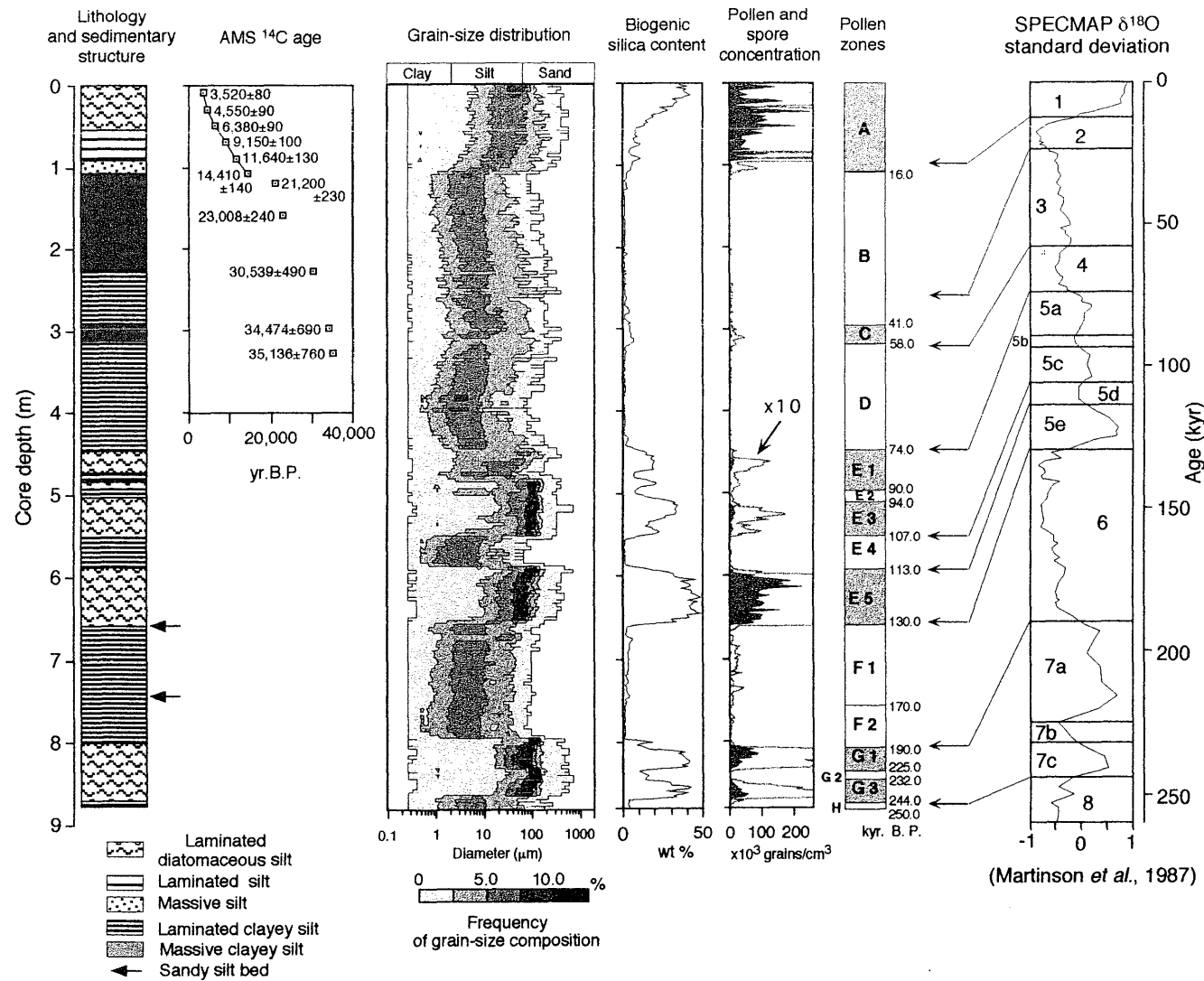


Fig. 2: Stratigraphic changes of Grain-size distribution, Biogenic silica content and Pollen and Spore concentration of core VER96/2 St. 3. Chronology of the core based on AMS ¹⁴C ages and climatic-proxy correlation with the standardized SPECMAP curves.

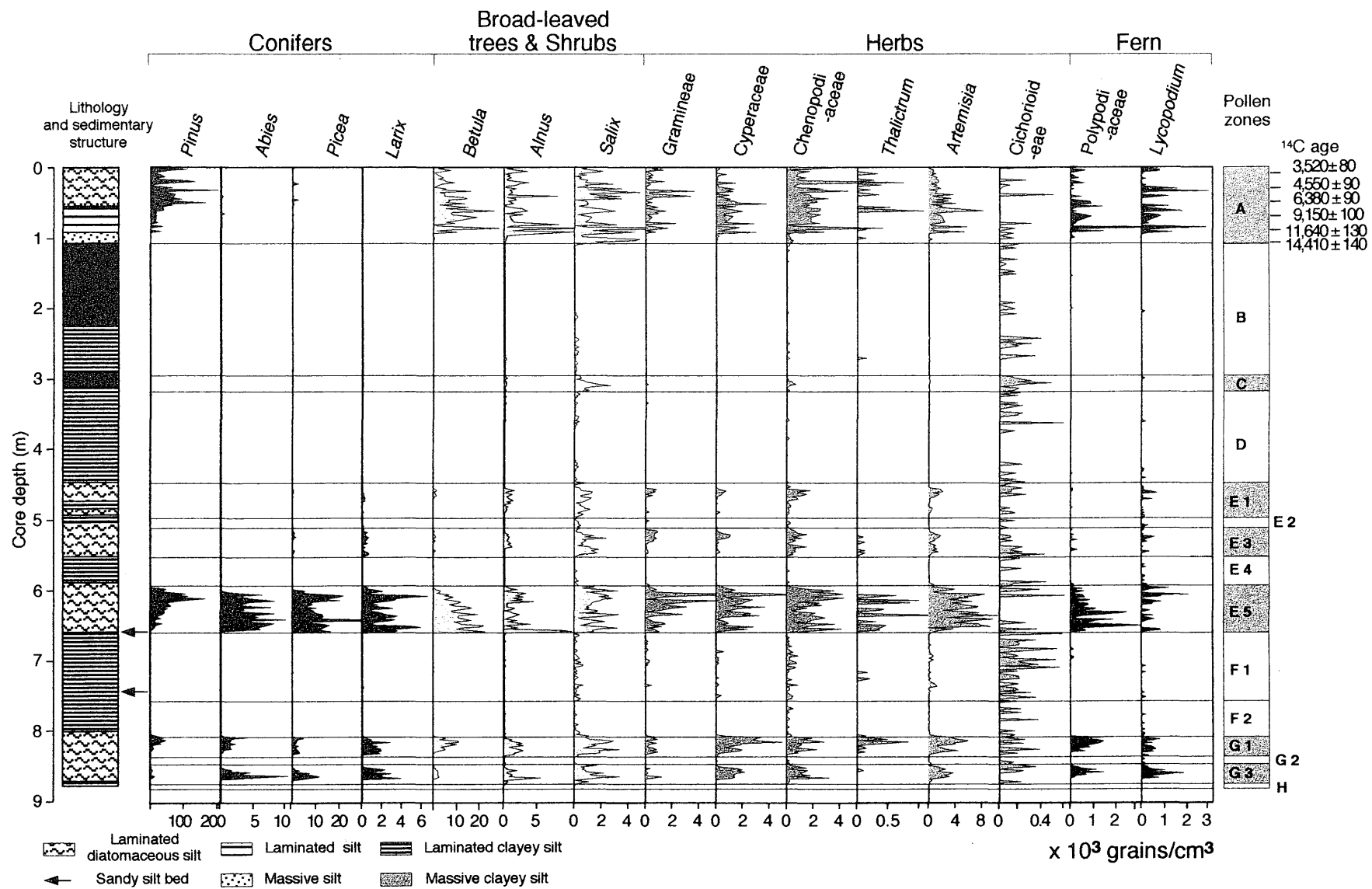


Fig. 3: Pollen concentration diagram of core VER96/2 St. 3.

$^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ 値を測定した。同時に精製した CO_2 の一部を用いて、ガス用安定同位体質量分析計 MAT-252 (FINNIGAN MAT-252)にて試料中の炭素の安定同位体対比を測定した。 ^{14}C 半減期を 5568 年とし、有機物交換の同位体分別効果を考慮し中村⁽¹⁴⁾ および小田⁽¹⁵⁾ に従い以下の式で補正して、AMS ^{14}C 年代値を求めた。

$$\text{AMS}^{14}\text{C Age} = -1 / ((\ln 2) / 5568) \cdot \ln ((R \cdot 0.9326) / (0.9142 \cdot (1 + C / 1000)))$$

ここで、R は試料の ($^{14}\text{C} / ^{13}\text{C}$ 比) / (標準試料の $^{14}\text{C} / ^{13}\text{C}$) 比で、C は試料の $\delta^{13}\text{C}$ 値である。標準試料には NBS oxalic acid SRM-4990 ($\delta^{13}\text{C} = -19.0\text{‰}$) を用いた。

花粉分析

バイカル湖アカデミシャンリッジの堆積物では総花粉量の少ない層準と多い層準とで 100 倍以上の極端な量差があることが知られている⁽¹¹⁾。このことを考慮し全ての層準で花粉群集変動の特徴を明らかにするため、以下の手順で各分類群ごとの花粉量の測定を行った。花粉の絶対量を測定するため、1g の乾燥試料にマーカー溶液 (Dupont 社製 microsphere; 40,000 grains/ml に調整) を 1 ml 加え、苛性カリ・フッ酸・アセトリシス法で処理した。花粉総量が少ない (5000grains/g 以下) 層準については各試料ごとにマーカー 200 個 (乾燥試料 5mg 当たり) で産出した花粉について同定し各分類群の花粉量を測定した。花粉総量が多い層準 (5000grains/g 以上) については、マーカー 50 個以上 (乾燥試料 1.25- 5.0mg 当たり) で出現する花粉を対象として 200 個程度を同定し、総花粉量と産出花粉頻度から各分類群の花粉量を計算した。測定した堆積物単位重量当たりの花粉・孢子量は堆積物密度⁽¹⁴⁾ で規格化し、堆積物単位体積当たりの花粉・孢子量を求めた。

生物源シリカ含有量

生物源シリカ含有量はアルカリ抽出法⁽¹⁶⁾により以下の手順で測定した。粉碎した乾燥試料 10~40mg に過酸化水素および塩酸処理を施し、蒸留水で洗浄した後に再び乾燥させた後、85°C の炭酸水素ナトリウム溶液で 5 時間かけて非晶質シリカを抽出した。この溶液について、誘導結合高周波プラズマ発光分光分析計 (ICP 61E Trace Analyzer) を用いて Si および Al 濃度を測定した。この Si 濃度から試料に含まれる非晶質 Si 量を計算した。ここで溶液中に含まれる碎屑物中の Si 量を考慮して、同時に測定した Al 含有量で Si 含有量を規格化⁽¹⁶⁾し、生物源シリカ含有量とした。

粒度分析

蒸留水に分散させた 10-20mg の未固結試料について、レーザー回折式粒度分析装

置（島津 SALD-3000）を用いて、0.1~2,000 μm の範囲で対数値刻みの 51 段階で粒径の頻度分布を測定した。Fig. 2 に示した粒度の頻度分布は体積%で表してある。

結果

年代値

深度 322.5cm までの測定試料について、炭素同位体年代の測定を行ったが (Table 1)、本コア試料で深度 326.5-119cm の有機炭素量が 0.33-0.46% と極めて低く、かつ得られた $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ 値が極めて小さいことから、本稿では深度 107-9cm での炭素同位体年代のみを採用した。得られた年代値に従い深度 107cm 以浅の堆積速度 (Fig. 2) を求めると、深度 107-9cm では 6.4-19.4cm/kyr であり下部から上部に向かって徐々に速くなる傾向がある。

花粉分析

針葉樹では *Pinus*、*Abies*、*Picea* および *Larix* が産出し、ごくまれに *Tsuga* が産出する。落葉広葉樹および低木類では *Betula* と *Alnus* および *Salix* が多産し、*Corylus* と *Carpinus* が少量であるが産出するほか、*Ericaceae* や *Ulmus*、*Rosaceae* などごくまれに産出する。草本類では *Gramineae*、*Cyperaceae*、*Chenopodiaceae* および *Artemisia* が主であるほか、少量の *Thalictrum*、*Caryophyllaceae*、*Cichorioideae* および *Carduoideae* の産出が確認され、極めて少量の *Labiatae* や *Umbelliferae* などの産出が認められた。シダ類では *Lycopodium*、*Polypodiaceae* および *Selaginella* の産出が認められた。本柱状試料では花粉総量 (Fig. 2) の多い層準と極めて少ない層準とで明瞭に区分できるが、各分類群で産出層準 (Fig. 3) が幾分異なっている。

本稿では VER96-2 St. 3 コアについて、花粉総量および産出花粉の組み合わせから、以下の花粉帯 (Fig. 2, Fig. 3) を設けた。ここでの花粉総量の変化は気候変動に伴う植生の消長を示している⁽¹¹⁾と考えられ、大まかに花粉総量の多い層準は間氷期に、逆に少ない層準は氷期に対比できる。

花粉帯 H (878.5-871.5 cm) : 花粉総量 1,000 grains/cm³ 以下と極めて少なく、木本類花粉の産出がほとんどない。

花粉帯 G3 (874.5-847.5cm) : 花粉総量が 10,000~60,000 grains/cm³ と極めて多い。針葉樹では *Pinus*、*Abies*、*Picea* および *Larix*、落葉広葉樹では *Betula*、低木類では *Alnus* と *Salix*、そして草本類では *Gramineae*、*Cyperaceae*、

Chenopodiaceae、*Artemisia*、*Thalictrum*、Caryophyllaceae、Cichorioideae および Carduoideae が多産する。なお、*Pinus* の産出は花粉帯 E5 および A に比べるとやや少な目である。

花粉帯 G2 (847.5-835.5cm)：花粉総量が 500 grains/cm³ 以下極めて少なく、木本類花粉の産出がほとんどない。

花粉帯 G1 (835.5-807.5cm)：花粉総量が 20,000~90,000 grains/cm³ が極めて多い。針葉樹の *Pinus*、*Abies*、*Picea* および *Larix* と落葉広葉樹の *Betula*、低木類の *Alnus* と *Salix*、および草本類が多産する。

花粉帯 F2 (807.5-757.5cm)：花粉総量が 1,000 grains/cm³ 以下と極めて少なく、草本類の Chenopodiaceae と Cichorioideae が僅かに産出する。

花粉帯 F1 (757.5-660.5cm)：花粉総量が 500~2,000 grains/cm³ と少なく、Gramineae、Cyperacea、Chenopodiaceae、*Artemisia* など草本類が産出する。僅かながら低木類の *Salix* も産出する。

花粉帯 E5 (660.5-592cm)：花粉総量が 50,000~150,000 grains/cm³ と極めて多い。針葉樹の *Pinus*、*Abies*、*Picea* および *Larix* と、落葉広葉樹の *Betula* および低木類の *Alnus*、*Salix* および草本類が多産する。

花粉帯 E4 (592-552cm)：花粉総量が 1,000 grains/cm³ 以下と極めて少なく、木本類花粉の産出がほとんどない。

花粉帯 E3 (552-511.5cm)：花粉総量が 2,000~12,000 grains/cm³ と多く、低木類の *Alnus* と *Salix* および草本類が産出するほか、針葉樹の *Picea* と *Larix* および落葉広葉樹の *Betula* が僅かに産出する。

花粉帯 E2(511.5-497.5cm)：花粉総量が 1,000 grains/cm³ 程度と極めて少なく、低木類の *Salix* および草本類の Chenopodiaceae と Cichorioideae が産出する。

花粉帯 E1 (497.5-447.5cm)：花粉総量が 3,000~10,000 grains/cm³ と多く、低木類の *Alnus* と *Salix* および草本類が多産するほか、針葉樹の *Picea* と *Larix* および落葉広葉樹の *Betula* が僅かに産出する。

花粉帯 D (447.5-319.5cm)：花粉総量が 1,000 grains/cm³ 以下と極めて少なく、木本類花粉の産出がほとんどない。

花粉帯 C (319.5-295.5cm)：花粉総量が 2,000~5,000 grains/cm³ 少なく、低木類の *Salix* および草本類の Chenopodiaceae と Cichorioideae が産出する。

花粉帯 B (295.5-108cm)：花粉総量が 1,000 grains/cm³ 以下と極めて少なく、木本類花粉の産出がほとんどない。

花粉帯 A (試料深度 108-0cm)：花粉総量が 10,000~220,000 grains/cm³ と極め

て多く、針葉樹の *Pinus*、落葉広葉樹の *Betula*、低木類の *Alnus* と *Salix* および草本類が多産する。

生物源シリカ含有量

0-50wt%の範囲で産出の多い層準と少ない層準を繰り返す(Fig. 2)。深度 876.5-870.5 cmでは 3%程度と少ない。深度 870.5-797.5cm では 8-40%と多く、特に深度 868.5-849.5cm と深度 832.5-809.5cm では 30-40%と極めて多い。深度 797.5-747.5cm では 0-1%と極めて少なく、その上位の深度 747.5-660.5 では 2-5%程度とあまり多くはない。深度 660.5-588cm では 30-47%に達し、全試料を通じて最も含有量が高い。深度 588-554cm では 0-1%で極端に少ない。深度 554-443.5cm では 5-30%の間で変動し、深度 546.5cm で 22%、深度 515.5cm で 33%、深度 488.5cm と 460.5cm で 20%とそれぞれ極大値をとる。深度 443.5-321.5cm では再び 0-2%と極めて少なくなり、深度 321.5-270cm では 2-6%で若干増加する。深度 270-110cm では再び 0-2%と極めて少なくなり、深度 107-54 cmでは 4-10%となり若干の増加が見られる。深度 54-28 cmでは上位に向かって 10%から 30%へと漸増する。深度 28-0cm においては 30-42%と極めて高い値を取る。

粒径分布

粘土質相と珪藻質相で、粒径分布パターンに極端な違いが認められる(Fig. 2)。粘土質層準では、分布域 0.3-200 μ m で 3-4 μ m に極大値を持ち、緩やかな山型の分布を成す。一方、珪藻質相では、分布域 0.3-600 μ m において 30-40 μ m と 80 μ m 或いは 120 μ m 付近で極大に達し、最頻値が 10%を越えることが多い。

堆積物粒子のスミアスライドによる顕微鏡観察から、珪藻質層準でのシルト～砂サイズ径粒子の大きさは、産出する各種珪藻化石種の大きさを示していることが確認できた。例えば深度 865-800cm、深度 670-600cm および深度 550-480cm での極大値である 120 μ m の粒径に相当する粒子は、*Stephanodiscus grandis*⁽²⁷⁾ のバルブの直径であることが判明した。また、試料深度 552-511.5cm、497.5-447.5cm、および 108-0cm での極大値である 30 μ m の粒径に相当する粒子は、*Aurlacoseira baikalensis*⁽²⁷⁾ の大きさであった。従って、それぞれの珪藻に富む層準の粒径分布に見る極大値の粒径は、その層準での珪藻化石群集の特性を示していることになる。また、珪藻殻に乏しい層準でのシルト粒子は、顕微鏡観察の結果、石英粒などの碎屑粒子であった。アカデミシャンリッジにはタービダイト性物質の供給がほとんどなく⁽⁷⁾、碎屑粒子の多くは水中あるいは空中浮遊物、もしくはアイスラフトによ

る供給であると考えられる。

考察

現存植生と花粉帯 A

深度 54cm 以浅（花粉帯 A 上部）での *Pinus* を主体とする針葉樹の花粉の含有量および生物源シリカ含有量があまり変化していないことから、この層準での堆積情報は現世の陸上植生および湖内生産性を反映していると考えられる。ここで花粉帯 A 上部における *Pinus* を主体とする針葉樹の含有量とアカデミシアンリッジ近傍の主たる現存植生であるトゥルカ（Turka）地方の *Pinus silbestris* 林⁽¹⁷⁾ との比較から、針葉樹花粉の多産する層準の植生は針葉樹林帯を示すと考えられる。一方、花粉帯 A 上部での *Chenopodiaceae* や *Artemisia*、*Gramineae*、*Cyperaceae* などの草本類花粉の含有量と、アカデミシアンリッジ近傍でオリホン（Ol'khon）島近辺に限られる現存植生のステップ⁽¹⁷⁾ との比較から、草本類花粉の増減はステップの進出の程度を示すと考えられる。

間氷期の植生

樹木花粉が主要な構成要素として識別された花粉帯が温暖な気候下に成立した森林植生に由来するものと考え、それぞれの花粉帯 G3、G1、E5 および A は間氷期に対比される。花粉帯 G3・G1 では *Pinus* の産出が花粉帯 A ほど顕著でなく、*Abies*、*Picea* および *Larix* が多産する。花粉帯 E5 では花粉帯 G3・G1 同様 *Abies*、*Picea* および *Larix* の産出ばかりでなく、花粉帯 A と同様に *Pinus* の産出も顕著である。このことは、花粉帯 G3・G1 と花粉帯 E5 および花粉帯 A ではそれぞれ針葉樹林の構成が違っていたことを示唆する。すなわち、花粉帯 G3・G1 では *Abies*、*Picea* および *Larix* 林が優先しており、花粉帯 E 5 では *Abies*、*Picea* および *Larix* 林に加え *Pinus* 林も発達していたが、花粉帯 A では *Pinus* 林のみが優占していたと考えられる。これらの針葉樹林の違いをもたらした原因について、以下に考察する。

現在のバイカル湖集水域での各針葉樹林の主な分布⁽¹⁷⁾ と気候条件⁽¹⁸⁾ を比較すると、*Pinus silbestris* 林は年間降水量 300-500mm のトゥルカ地方とプリモルスキー（Primorsky）山脈にみられる。一方、*Pinus sibirica* と *Abies* および *Picea* 林はハマルダバン（Khamar-Daban）山脈とバイカルスキー（Baikalsky）山脈近辺に、*Larix* 林はバルグジンスキー（Barguzinsky）山脈近辺にそれぞれ分布しており、いずれの地域も年間降水量は 500-1000mm である。このように、針葉樹林の樹種の違いは年

間降水量に規制されていると解釈される。VER96-2 St. 3 での *Pinus* のほとんどを *Pinus silbestris* (二葉マツ) とし、*Pinus* 林と *Abies*、*Picea* および *Larix* 林の違いを乾燥-湿潤を表す指標とすれば、花粉帯 A では *Pinus* 林が発達する比較的乾燥な気候であるのに対して、花粉帯 G3・G1 は *Abies*、*Picea* および *Larix* 林が優占する年間降水量 500-1000mm の湿潤な気候であり、花粉帯 E5 では年間降水量 400-700mm 程度の中間的な気候下に成立した植生に由来していたと推測される。

亜間氷期の植生

花粉帯 E1 から E3 にかけての時期には、針葉樹や落葉広葉樹の産出が少ない。つまりこの期間は上述の間氷期のごとく温暖ではなく、森林植生の発達しない冷涼な気候であったと推察される。またこの時期に出現する樹種は低木類の *Alnus* と *Salix* であることから植生は低木ツンドラと推定され、この時期に湿地の出現が推定される。これは従来、山岳氷河の融解に伴う湿地の出現⁽¹¹⁾が原因である解釈されているが、本論では別の要因による湿地出現の可能性を解釈しておく。

現在の極域に近い極寒冷気候帯において、永続的に凍結した大地の層(永久凍土)が分布している。このような地域では、たとえ夏季に凍土表層(活動層)が融解したとしても、その冷涼な気候のため水分の蒸発も少なく、かつ活動層の下位に存在する凍土層が不透水層になるため排水も困難になる。つまり永久凍土帯では、夏季において水分で飽和された湿潤な土壌が出現するのである⁽¹⁹⁾。このような土壌学的水文学的システムで花粉帯 E1 から E3 においてバイカル湖集水域で湿地が出現していたと考えることができる。また現在の植生では樹木限界が最暖月の 10°C 等温線最暖に一致することが知られているので、当時の最暖月気温が 10°C 以上であったことが推定できる。

花粉帯 E1 から E3 の間の花粉帯 E2 では花粉総量が減少し、樹木花粉では低木の *Salix* のみの産出となり、この時期の一時的な寒冷化により植生が衰退したことを示している。花粉帯 C では、花粉総量が少ないにも関わらずその上下の層準に比して *Salix* が増加していることより、この時期にも温暖化による永久凍土上での活動層の発達が進み、湿地が拡大して *Salix* の低木林が進出していたと考えられる。しかし *Alnus* を欠いていることから花粉帯 E1 から E3 に比して寒冷であった可能性がある。

氷期の植生

すべての層準から Cichorioideae が非常に僅かながら産出することから、氷期でも若干の草本類が生育していたと推察される。すなわち氷期においても永久凍土上

での活動層が最暖月に出現しており、植物が利用できる融解した水が夏期に存在していたことを示す。このように、バイカル湖集水域では年間最高気温が0°Cを下回ることがなかったのかもしれない。花粉含有量の少ない花粉帯は、前述の花粉帯 C を除くと、ほとんど花粉の産出しない花粉帯 H、G2、F2、E4、D および B と、草本類 (Chenopodiaceae や *Artemisia*、Gramineae、Cyperaceae) およびわずかの低木 (*Salix*) が産出する花粉帯 F1 に大別できる。前者の植生は、花粉産出量の少なから寒冷乾燥の亜極地性砂漠⁽²⁰⁾ のような植物の生育が極めて制限されていた環境であったと考えられる。花粉帯 F1 の植生帯は、草本類の産出が花粉帯 H、G2、F2、E4、D および B に比べ多く、かつ完新世の花粉帯 A に比べ少ないことから、ツンドラステップに相当すると考えられる。F1 は他の氷期に比して夏季の気温が若干高く、植物の生育可能な永久凍土上の活動層が比較的発達していたのかもしれない。また低木である *Salix* があまり産出しないことから樹木限界の最暖月気温 10°C以下の冷涼な気候であったと推定される。

植生変遷の過程

花粉帯 B から花粉帯 A、花粉帯 F1 から花粉帯 E5、花粉帯 G2 から花粉帯 G1 および花粉帯 H から花粉帯 G3 など、氷期から間氷期への移行層準では、下位から低木類の *Salix*、次に *Alnus*、それから高木類の *Betula*、そして針葉樹である *Pinus*、*Picea*、*Abies* あるいは *Larix* の順に花粉量が増加する傾向にある。この傾向は最終氷期から完新世にかけての移行期でも認められ、温暖化による永久凍土の活動層の発達に伴い湿地が拡大した結果、湿地に適応する *Salix* が進出し、続く *Alnus* の進出により植生が拡大し、さらに植生拡大の度合いが進むと高木類の *Betula* が卓越し、最後に *Pinus* などの針葉樹林が繁栄するためと解釈できる。それぞれの氷期から間氷期への移行期において、針葉樹林の樹種に *Picea*、*Abies* あるいは *Larix* が加わる以外は最終氷期から完新世にかけての植生変遷と同様であり、温暖化に伴う植生変遷の機構は全層準を通じて変わらないことを示している。

花粉帯と同位体ステージとの対比

花粉帯 B から A にかけての寒冷期から温暖期への植生遷移を示す *Alnus* と *Pinus* の増加開始が、炭素同位体年代よりそれぞれ 14,000yr. B. P. と 12,300 yr. B. P. と推定され、花粉帯 A での *Pinus* 増加時期以降が酸素同位体ステージ 1 に対比される。また花粉帯 A の最下部での *Salix* の増加開始時期については尾田他⁽¹¹⁾ との対比から 16,000 yr. B. P. と推定した。一方、有効な炭素同位体年代が測定できなかった深度

107cm 以深の堆積物については別の年代推定が必要となる。バイカル湖の堆積物での生物源シリカ含有量は、温暖期に高い値を取ることが知られており⁽²¹⁻²⁴⁾、この変動を地球規模での気候変動の応答と考えることによって、地球軌道要素により年代値を調整された酸素同位体変動曲線⁽²⁵⁾との比較から堆積物の層序年代を推定した。これまでアカデミシャンリッジで採取されたピストンコアでの研究⁽¹⁾との比較から、本コア試料で生物源シリカの含有量で高い値を取る層準に一致する花粉帯 G3 から G1、E5、および E3 から E1 をそれぞれ同位体ステージ 7 (244,000- 190,000 yr. B. P.)、5e (130,000- 113,000 yr. B. P.) および 5c~5a (107,000- 74,000 yr. B. P.) に対比した。この内、同位体ステージ 7 および 5c~5a 相当の層準で生物源シリカ含有量が極小値を取り、かつ花粉帯で寒冷期を示す花粉帯 G2 および E2 をそれぞれ同位体ステージ 7b (232,000- 225,000 yr. B. P.) および 5b (94,000- 90,000 yr. B. P.) に対比した。また花粉帯 C とほぼ同層準の生物源シリカ含有量の比較的高い深度 321.5-270cm を同位体ステージ 3 (59000-24000 yr. B. P.) に対比させ、この年代値から換算した堆積速度より花粉帯 C は 58,000- 41,000 yr. B. P. と見積もった。深度 747.5- 660.5cm においても生物源シリカ含有量が若干高い値を取るが、同層準での花粉帯 F2 のツンドラステップが上述のように温暖化を示すものでないことから、F2 および F1 を通じて同位体ステージ 6 (190,000- 130,000 yr. B. P.) に対比し、この年代値から換算した堆積速度より花粉帯 F1 と F2 の境界は 170,000 yr. B. P. と見積もった。コア試料最下部の花粉帯 H を同位体ステージ 8 に対比すると、VER96-2 St. 3 コアは過去 250,000 年間の堆積記録を保存していると考えられる。以上のように推定した年代値を基に堆積速度を見積もると、0.8-19.4 cm/kyr の範囲で変動するが、その平均値は 3.5 cm/kyr となり、これまで見積もられてきたアカデミアリッジでの堆積速度 4cm/kyr^{(3) (26)} とほぼ一致する。

バイカル湖集水域での陸上植生変化と湖内珪藻生産力

Fig. 2 で示される生物源シリカ含有量の増減は、湖内生産性の変動を反映している^{(1-3) (21-24)}と考えられ、総花粉・胞子含有量変動と比較したとき、湖内生産性変動は陸上植生の消長と極めてよく一致していることが分かる。Horiuchi *et al.*⁽⁷⁾ は、最終氷期から後氷期にかけて植生が関与する土壌形成の程度が全地球的気候変動に応答しており、土壌に起源する栄養塩類の湖内への供給量が変化し、これに答えて湖内での珪藻生産性が増減するためと解釈した。本研究の結果から、このような地球環境変動に対する湖内生産性の応答が少なくとも 250,000 yr. B. P. まで遡って同様に説明できることが明らかとなった。本論では集水域環境変動と湖内への栄養塩の

供給の関係について、さらに深く考察してみる。

現在の北極域での湖沼では、その集水域の土壌が凍結しているため、栄養塩類の供給がきわめて少ないことが知られている⁽²⁰⁾。ここで、バイカル湖集水系において湖内への栄養塩供給が土壌の凍結、つまり永久凍土の発達によって制限されてきたと考えてみよう。現在のバイカル湖集水域では永久凍土の分布は非連続的であり、かつ針葉樹林が発達するような排水が十分に行われている土壌が分布している。すなわち土壌生成作用によって溶脱された栄養塩類が、排水によって集水域から湖内に流入するシステムが存在していると推定される。現世植生との対比がつく花粉帯 A 最上部においては、生物源シリカ含有量が 40%と極めて高く、湖内での珪藻生産力が極めて高いことの説明が付く。針葉樹林の十分発達していた他の間氷期の花粉帯 (G3、G1、E5) について、生物源シリカ含有量が 30~50%と極めて高いこともこの解釈を裏付ける。

一方、氷期である花粉帯 H、G2、F2、E4、D および B においては、現在の北極域の湖沼同様、永年の土壌凍結による栄養塩溶脱の抑制があったことは容易に想像できる。つまり、夏季において凍土上の活動層がほとんど発達しないため、土壌から湖内へ排水される水量が圧倒的に少なく、これに溶存する栄養塩類の湖内への流入もきわめて少なくなると考えられる。

低木ツンドラと推定した花粉帯 C 及びステップツンドラの花粉帯 F1 では、堆積物中の生物源シリカ含有量が 2-6%程度であり、花粉帯 H、G2、F2、E4、D に比して湖内珪藻生産力が若干高くなっている。これは恐らく、この亜間氷期において永久凍土上の活動層が発達し、氷期の極相期に比べ土壌から湖内へ排出される栄養塩の量が増えたためであると考えられる。

花粉帯 E1 から E3 では、上記の花粉帯 C と同様に低木ツンドラと推定されるにもかかわらず、堆積物中の生物源シリカ含有量が 10-30%程度であり、花粉帯 C に比べ湖内での生産力が高かったと推定される。これら花粉帯 (E1、E3) での集水域土壌が永久凍土の排水不良に由来する湿地であるとする、花粉帯 C と同様に湖内へ流入する栄養塩の量も少なくなるはずである。しかしここで、この花粉帯 E1 から E3 では、花粉帯 C にくらべ低木の *Alnus* や草本類が多いことから、集水域植生の多様性や生産力が高かったと推定できる。そして、そこで生産される有機物量が増えることにより土壌中で腐食物が増加し、冷温土壌下で特有のポドゾル化作用が促進されれば、溶脱される栄養塩（ここでは特に珪藻に対してきわめて重要な珪酸塩）が増加する可能性がある。このように永久凍土上による栄養塩流出の制限のほか、土壌生成作用（ここではポドゾル化作用）による栄養塩の用脱も湖内生産力に大きく

影響していたのかもしれない。

ところで花粉帯 E1 から E3 の間において、集水域での生産力が極端に下がる花粉帯 E2 が存在する。この時期は、他の陸上生産力低下時期に比べ、それほどの湖内生産力が減少していない（生物源シリカ含有量 10%）。湖内生産力が陸上からの栄養塩供給のみに依存しているとする、ここでの湖内生産力の高さは説明できない。栄養塩類の湖内での一時的滞留が存在したのかもしれない。

最後に、珪藻群集の組成変化と陸上植生の変遷との比較を試みる。湿潤気候を示す *Picea*, *Abies* および *Larix* 林の発達していた花粉帯 G3 と G1 および E5 では 100-120 μ m 径の珪藻種 (*Stephanodiscus grandis*)⁽²⁾ が卓越しているが、乾燥気候を示す *Pinus* 林のみ発達していた花粉帯 A では 30-40 μ m の珪藻種 (*Aurlacoseira baikalensis*)⁽²⁾ が卓越しており、陸上植生の変化と珪藻群集変化が良く一致している (Fig. 2)。バイカル湖内での珪藻生産性が栄養塩を供給する土壌形成に大きく依存していると考えらるなら、堆積物に含まれる珪藻群集の違いは陸上植生に由来する栄養塩類の質的变化に起因すると解釈できる。

要約

バイカル湖アカデミシャンリッジで採取したコア VER96-2 St. 3 について花粉分析を行った結果、過去 250,000 年間にわたるバイカル湖集水域での植生変遷が明らかになった。氷期（同位体ステージ 2、4、5d、6）には、亜極地性砂漠或いはステップツンドラといった極めて貧弱な植生が永久凍土上に広がっていた。亜間氷期（同位体ステージ 3、5a、5c）には、永久凍土の活動層上に湿地が形成され、そこに低木林が生育していた。間氷期（同位体ステージ 1、5e、7a、7c）では針葉樹林が発達した。これら集水域での永久凍土の発達とそれに伴う植生の変化は、土壌からの栄養塩の流出を制御し、バイカル湖内での珪藻生産力に多大な影響を与えた。そして、気候変動に依存した集水域の土壌形成は、栄養塩溶脱作用の質的变化を生み出し、湖内の珪藻群集構成にまで影響をもたらした可能性がある。

謝辞

本論で使用した試料の採取には、ロシア科学アカデミー陸水学研究所の M. Grachev 所長の協力を得た。生物源シリカの測定には東京大学原子力研究総合センターの堀内一穂博士の協力を得た。

引用文献

- (1) Colman, S. M., Peck, J. A., Karabanov, E. B., Carter, S. J., Bradbury, J. P., King, J. W., Williams, D. F.: Central climate response to orbital forcing from biogenic silica records in Lake Baikal. *Nature* 378, 769-771 (1995)
- (2) Grachev, M. A., Likhoshvai, E. V., Vorobyova, S. S., Khlystov, O. M., Bezrukova, E. V., Veinberg, E. V., Goldberg, E. L., Granina, L. Z., Kornakava, E. G., Lazo, F. I., Levina, O. V., Letunova, P. P., Otinov, P. V., Pirog, V. V., Fedotov, A. P., Iaskevich, S. A., Bobrov, V. A., Sukhorukov, F. V., Rezchikov, V. I., Fedorin, M. A., Zolotarev, K. V., Kravchinsky, V. A.: Signal of the paleoclimates of upper Pleistocene in the sediments of Lake Baikal. *Russian geology and geophysics* 38 (5), 957-980 (1997)
- (3) Williams, D. F., Peck, J., Karabanov, E. B., Prokopenko, A. A., Kravchinsky, V., King, J., Kuzmin, M. I.: Lake Baikal Record of Continental Climate Response to Orbital Insolation During the Past 5 Million years. *Science* 278, 1114-1117 (1997)
- (4) Yuretich, R., Melles, M., Sarata, B.: Clay minerals in the sediments of Lake Baikal: A useful climate proxy. *Journal of Sedimentary Research* 69 (3), 588-596 (1999)
- (5) Prokopenko, A. A., Williams, D. F., Karabanov, E. B., Khursevich, G. K.: Response of Lake Baikal ecosystem to climate forcing and $p\text{CO}_2$ change over the last glacial/ interglacial transition. *Earth and Planetary Science Letters* 172, 239-253 (1999),
- (6) Karabanov, E. B., Prokopenko, A. A., Williams, D. F., Khursevich, G. K.: A new record of Holocene climate change from the bottom sediments of Lake Baikal. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 156, 211-224 (2000)
- (7) Horiuchi, K., Minoura, K., Hoshino, K., Oda, T., Nakamura, T., Kawai, T.: Palaeoenvironmental History of Lake Baikal during the last 23,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 157, 95-108 (2000)
- (8) Takeuti, S., Oda, T., Kawai, T.: Palynostratigraphy of core BDP93-1 from Lake Baikal, southeastern siberia. *Saito H0-on Kai Museum Research Bulletin* 63, 1-7, (1995)
- (9) BDP-93 Working Group: Preliminary result of the First drilling on Lake

- Baikal, Bugldeika Isthmus. *Russian Geology and Geophysics* 36 (2), 1-26, (1995)
- (10) Bezrukova, E. B.: Palynology of lateglacial and Holocene sediments of Lake Baikal (In Russian). *Geography and Natural Resources* 3, 54-61 (1998)
- (11) 尾田武文・佐藤智洋・高原 光・箕浦幸治・長谷義隆・三好教夫・中村俊夫：
バイカル湖集水域における最終氷期～後氷期植生変遷。地球環境変動の科学（井上・
柏谷・箕浦編著。古今書院 pp. 201-211 (1998)
- (12) 三好教夫・竹内 徹・片岡祐子・上田圭一・守田益宗・河室公康・高原 光・
長谷義隆・井内美郎・尾田武文・箕浦幸治：バイカル湖内上部堆積物 (VER94/5-St. 21)
の花粉分析。日本花粉学会誌 45-1、27-34 (1999)
- (13) Minoura, K., Oda, T., Nakamura, T., Tanchi, C., Sakai H., Kawai, T.:
Estimation of the loss from the upper layer of sediments in the cores from
boreholes BDP-96-1 and BDP-96-2 (Lake Baikal), *Russian geology and geophysics*.
40 (8), 1262-1268 (1999)
- (14) 中村俊夫：タンデトロン加速器質量分析計による ^{14}C 測定における炭素同位
対比分別の補正について— ^{14}C 年代産出の手引き—。名古屋大学加速器質量分析計業績
報告書 (V)、名古屋大学年代試料研究センター、pp. 237-243 (1994)
- (15) 小田寛貴：加速器質量分析計による $^{14}\text{C} / ^{13}\text{C}$ 比測定における同位体効果の補
正。名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 (V)、名古屋大学年代試料研究センター、
pp. 244-251 (1994)
- (16) Mortlock, R. A., Froelich, P. N.: A simple method for the rapid
determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Research* 36,
1415-1426 (1989)
- (17) Eggimann, D. W., Manheim, F. T., Betzer, P.: Dissolution and analysis of
amorphous silica in marin sediments. *Journal of Sedimentary Petrology* 50, 215-
225 (1980)
- (18) Davidov, Yu. S., Karashnikov, E. N., Swicheva, I. V.: Forest. In Baikal Atlas.
Garazy, G. I. (Ed.), Nauka, Moskow, p. 132-133 (1993)
- (19) Bridges E. M.: World soils, Cambridge University Press, London (1978)
- (20) Whittaker R. H.: Communities and ecosystem, The Macmillan Company,
New York (1975)
- (21) Bezrukova, Y. V., Bogdoanov, Y. A, Williams, D. F., Granina, L. Z.,
Grachev, M. A., Ignatova, N. V., Karabanov, Ye. B., Kuprsov, V. M., Kurylev, A V.,
Letunova, P. P., Likjoshvay, Y. V., Chernyoyeva, G. P., Shimarayeva, M. K.,

Yakushin, A. O.: Deep-seated change in the ecosystem of northern Lake Baikal during the Holocene. *Akademiya Nauk SSSR Doklady* 321, 1032-1037, (1991)

(22) Qiu, L., Williams, D. F., Gvozdkov, A., Karabanov, Y. B. and Shimarayeva, M. K.: Biogenic silica accumulation and paleoproductivity in the northern basin of Lake Baikal during the Holocene. *Geology* 21, 25-28, (1993)

(23) Granina, L. Z., Grachev, M. A., Karabanov, Y. B., Kuprsov, V. M., Shimarayeva, M. K., Williams, D. F.: Accumulation of biogenic silica in bottom sediments of Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 34, 126-135, (1993)

(24) Carter, S. J., Colman, S. M.: Biogenic Silica records in Lake Baikal sediments: result from 1990-1992 American cores. *Journal of Great Lakes Research* 20 (4), 751-760 (1994)

(25) Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., Imbrie, J., Moore Jr, T. C., Shackleton, N. J.: Age Dating and the Orbital theory of the ice Ages: Development of a High-resolution 0 to 300,000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research* 27, 1-29 (1987)

(26) Colman, S. M., Jones, G. A., Rubin, M., King, J. W., Peck, J. A., Orem, W. H.: AMS radiocarbon analyses from Lake Baikal, Siberia: Challenges of dating sediments from a large, oligotrophic lake. *Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)* 15, 669-684, (1996)

(27) Bradbury, J. P., Bezrukova, E. V., Chernyaeva, G., Colman, S. M., Khrusevich, G., King, J., Likhoshway, Y.: A synthesis of post-glacial diatom records from Lake Baikal. *Journal of Paleolimnology* 10, 231-251 (1994)

Vegetation history of the Baikal drainage basin during the last 250,000 years

Takefumi ODA¹⁾, Koji MINOURA²⁾, Chizu FUJIMURA²⁾, Toshio NAKAMURA¹⁾
and Takayoshi KAWAI³⁾

¹⁾ *Dating and Materials Reserch Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya 464-0814, Japan*

²⁾ *Institute of Geology and Paleontology, Tohoku University, Aoba, Aramaki Sendai 980-8578, Japan*

³⁾ *Environmental Chemistry Division, National Institute for Ecology, 16-2 Onogawa, Tsukuba, 305-0053, Japan*

Abstract

Vegetation history of the Baikal drainage basin during the last 250,000 years was reconstructed from a pollen analysis of the core VER96/2 St. 3 recovered from Academician ridge in Lake Baikal. Sub arctic desert or steppe tundra was spread in the glacial epoch (oxygen isotope stage 2, 4, 5d and 6) in this region. In the interstade (stage 3, 5a and 5c), scrub was overgrown in the swamp formed on the active layer of permafrost. Coniferous forest developed in the interglacial epoch (stage 1, 5e, 7a and 7c). The development of permafrost and vegetation changes on the Baikal drainage basin controlled leaching nutrient flux to the lake, and influenced enormously to the aquatic diatom productivity in the Lake Baikal. The leaching nutrient variations from different pedogenesis related to global climatic changes intensely affected the components of diatom assemblage in Lake Baikal.

学会等発表

尾田武文 (2001) バイカル湖堆積記録から読み取る、過去500万年間のシベリア植生変遷と湖内生物の相互作用。日本花粉学会第42回大会

発表論文

尾田武文、箕浦幸治、藤村千鶴、中村俊夫、河合崇欣、バイカル湖集水域における過去25万年間の植生変遷。日本花粉学会誌46 (2) 81-92 (2000)

Horiuchi K., Minoura, K., Hoshino, K., Oda, T., Nakamura, T., Kawai, T.,: Palaeoenvironmental History of Lake Baikal during the last 23,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 157, 95-108 (2000)

Horiuchi, K., Kobayashi, K., Oda, T., Nakamura, T., Fujimura, C., Matsuzaki, H., and Shibata, Y., Climate-induced fluctuations of ^{10}Be concentration in Lake Baikal sediments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 172, 562-567 (2000)

Minoura, K., Oda, T., Nakamura, T., Tanchi, C., Sakai, H., Kawai, T.: Estimation of the loss from the upper layer of sediments in the cores from boreholes BDP-96-1 and BDP-96-2 (Lake Baikal), *Russian geology and geophysics*. 40 (8), 1262-1268 (1999)

尾田武文・佐藤智洋・高原 光・箕浦幸治・長谷義隆・三好教夫・中村俊夫：バイカル湖集水域における最終氷期～後氷期植生変遷。地球環境変動の科学（井上・柏谷・箕浦編著。古今書院 p. 201-211 (1998)

尾田武文、箕浦幸治、丹地千鶴、中村俊夫。バイカル湖集水域における後期更新世—完新世の植生変遷。1997年度日本BICER協議会年報 21-27 (1998)