

第4章 環日本海域の湖沼堆積物に刻まれた地球環境変動

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/2475

第 4 章

環日本海域の湖沼堆積物に刻まれた地球環境変動

金沢大学自然計測応用研究センター

柏谷 健二

e-mail: kashi@kenroku.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

現在は地球史的には新生代後期の氷河時代である。そして私たちはその中間氷期に生きているのである。地球環境変動を考える場合には、先ずこのような大きな気候変動の背景を理解しておかなければならない。現在の陸域環境は後氷期とも呼ばれている間氷期を通して形成されてきたものであるが、その基本的な枠組みは新生代後期の初頭に遡ることができる。そしてこれは現在の気候システム・地球環境システムの確立という問題に対応するが、システムの変更の大きな境界としては、北半球における氷床の拡大に関係するとされている約 2.8MyrB.P. (Myr B.P.=百万年前) が有力である(1)。新生代における寒冷化傾向はこの時期より大きな振幅を伴ったものになり、氷期・間氷期が繰り返されるようになり氷河時代に突入するのである。このシステムの確立にはヒマラヤ山脈・チベット高原の隆起やパナマ地峡の閉塞等が関与しているとこれまでに考えられてきた(2, 3)。さらに、最近ではインドネシア海域の地殻変動がこのシステムの変更に関与しているという説も報告されており(4)、地球環境変動・気候変動の大きな研究対象の一つである。

この氷河時代において 10 万年に 1 回の間氷期を迎えるといった規則的な振動を示すのは約 70-80 万年前からであるが、これにもヒマラヤ・チベットの更なる隆起にその原因を求める考え方もあり(5)、大気大循環における大きな突起部の存在が極めて重要であることを示唆している。日本列島の位置はこの大気の流れがヒマラヤ・チベットという突起部を迂回する流下方向にあり、大気大循環の変動の大きな影響を受ける。これは東アジアモンスーンの確立やその強弱とも関係し日本の自然環境の基本的な枠組みの一つを形成している。さらに北半球中緯度・環日本海域は後述するように長周期の気候変動を左右す

る日射量変動に鋭敏な地域を含んでおり、気候変動そして自然環境の変動を検討するためには極めて重要な場所に位置している。

私たちは近代以降の観測時代に関しては気象・気候に関する詳細な資料を入手することができるようになり、地球環境の変動に関して種々多様な議論が可能になった。そして今後の変動に関する予測も、限界はあるが、徐々に可能になってきている。この限界の一つは連続的資料が時間的・空間的に限定されているということである。現在、予測やメカニズムに関する詳細な議論が行われているのは主として観測時代の定量的な資料に基づくものなのである。これは小氷期(約 1500-1900 年)の終焉時からその後の温暖な時期に限定された資料である。それ以前は文書も含めた各種の代理資料を用いなければならない。

私たちが地球環境の変動とそれへの応答を予知・予測も含めて明らかにするためには、完新世という現在の間氷期を含む長期的な背景とともに観測時代に繋がる過去数百年あるいは有史時代における資料の復元が必要である。これらの資料はその解析に現在の地球表層部の諸過程に関する知見の活用が考えられる点でかなり有効である。さらにこれには小氷期および中世温暖期という寒冷および温暖な時期が含まれ、そこでの諸環境情報が、断片的ではあるが史料としても残されているものがあるということも重要である。

それではこの時期を含む連続的な情報はどのような代理資料から得られるかという問題となる。一般にこれまで利用されてきたものとしては、多くのものが長期的変動解析と同様であるが、樹木年輪試料、海底堆積物試料、氷成堆積物試料、湖沼堆積物試料、風成堆積物試料等が挙げられる。環日本海域では氷成堆積物試料を除いていずれも利用可能であるが、生物活動を含む陸域部における各種現象との対応を

考えれば、解像度とその連続した長さという点からも湖沼堆積物試料が最適であろう。とりわけ湖沼一流域系という観点からの湖沼堆積物の解析は流域過程の理解にも重要である。

本章では湖沼堆積物の解析から読み取ることのできる長周期の地球環境変動と観測資料と比較できる短期の地表環境の変動を取り上げ、そのいくつかについて解説する。

2. 長周期環境変動

環日本海域における陸域の長期的な試料としてはわが国で 1970 年に掘削された琵琶湖の湖沼堆積物 (200m コア試料) が最初である。これは長期湖沼堆積物試料掘削の先駆けともなり、貴重な多くの資料をもたらしたが (Horie, 1984) (6), ブリュヌ・松山境界 (約 78 万年前) 等の明瞭な時間面が認められなかったため、当初の経時的変動に関する議論は相対的なものであった。絶対的な時間軸の導入やグローバルな変動との対比は 1983 年にほぼ同様の地点で掘削された 1400m コア試料の解析、考察後になったが (Kashiwaya *et al.*, 1991; Meyers *et al.*, 1993) (7, 8), この 200m コア試料には過去約 35 万年の記録が残されていることがわかった (図 1)。

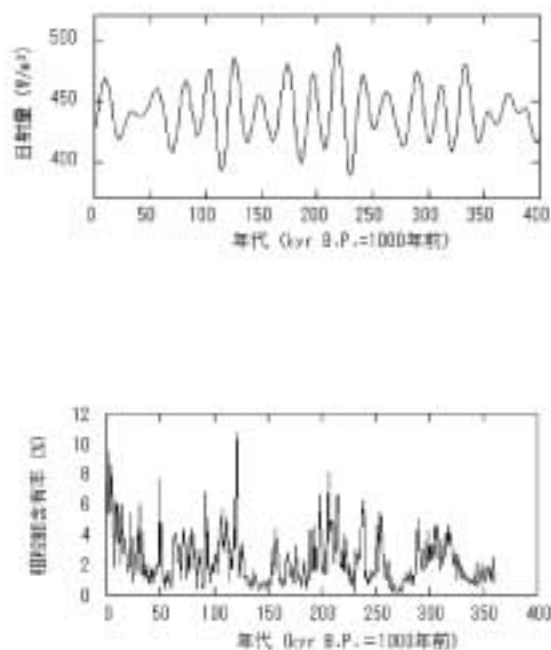


図 1. 日射量の変動 (北半球平均) (上) と 1971 年に琵琶湖で掘削された 200m ボーリングコア試料の分析結果、堆積物の中に含まれる粗粒部 ($4.5 \phi = 44 \mu$ より粗いもの) 含有率の変動 (下)。

水文環境に関わる粒度組成の基本的な変動はグローバルな気候変動そして日射量変動に調和し、間氷期には多雨、氷期には寡雨という関係があることが明らかとなり、また日射量変動を決定する三つの軌道要素に対応する周期も明瞭に刻まれていることが分かった (図 2)。ここでの三つの軌道要素とは離心率、地軸の傾斜角、気候歳差であり、それぞれが約 41 万年と 10 万年、約 4 万年、約 2 万年の卓越周期をもっている。これらの周期は気候変動の天文学理論について包括的な研究をしたユーゴスラビアの地球物理学者ミランコヴィッチにちなんでミランコヴィッチサイクルと呼ばれている (Milankovitch, 1941; 安成・柏谷, 1992) (9, 10)。

日射量変動の地理的な気候変動への影響については、Short *et al.* (1991)(11)が海陸分布を考慮した熱平衡気候モデルにおいて、日射量変動に対する熱的応答が敏感な地域は、海洋よりも陸域であり、最も敏感な場所は北緯 60° 東経 100° を中心とする北半球中緯度の陸域部であることを指摘している。この陸域と海洋の感度の差は熱容量の相違に起因している。このモデルでは高度は考慮されていないので、チベット高原の熱的効果を考慮すれば多少変動するが、ユーラシア東部・環日本海域の大陸側ではより鋭敏な気候変動の記録が残されている可能性がある。

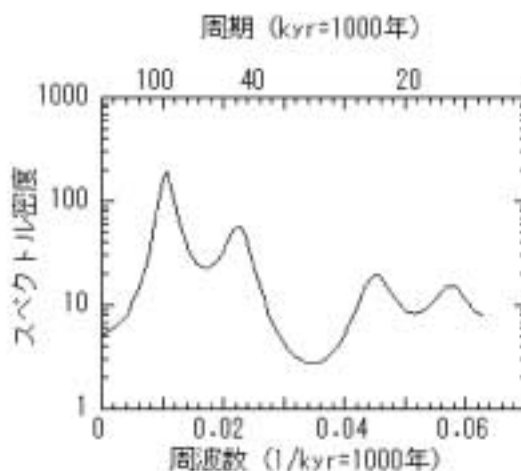


図 2. 粗粒部含有率の変動に含まれる卓越周期。三つの軌道要素 (離心率、地軸の傾斜角、歳差) に関係するが約 41 万年と 10 万年、約 4 万年、約 2 万年 (2.3 万年と 1.9 万年) の周期が認められる。

それではこの記録はどこに残されている可能性があるのだろうか。ユーラシア東部の地図でこの付近を眺めれば、バイカル湖や黄土高原が認められる。即ちバイカル湖の湖沼堆積物や黄土高原のレス・風成堆積物に残された記録がその可能性を秘めている。

先のモデルは日本列島を考慮した詳細なものではないので、感度に関する琵琶湖の評価は難しいが、大陸内部ほどではないが海洋よりは敏感であることが推察され、比較の対象としても重要であろう。

黄土高原の風成堆積物の地質学的な研究自体は早くから進められていたが、グローバルな対比が可能な詳細な解説は、黄土層における古地磁気年代が確立していく1980年代からであろう。ここでは古土壌が温暖期そして黄土が寒冷期に相当し、帯磁率の大小がやはり温暖期・寒冷期に対応することが明らかにされ、深海底のコアにおける酸素同位対比の変動との詳細な対応についても報告されている(12)。近年、粒度の変動と酸素同位体比変動との対応、そしてその周期性に関する研究も報告されており、ミランコヴィッチサイクルの検討が行われている(13)。過去250万年間の記録であるが、50-80万年前、160-170万年前に気候の大きな変動があったことを示し、60万年前以降では10万年周期が卓越し、80-160万年前には4.1万年周期が卓越していたことが明らかにされている。また、過去700万年の堆積層の存在(Ding *et al.*, 1999) (14)や2200万年の堆積開始が指摘されており(Guo *et al.*, 2002) (15)、ユーラシア東部・環日本海域の長周期環境変動を論ずるためには重要な試料である。黄土は地表部に堆積するために一般に浸食や風食に曝される場合も多いので、他の記録と比較して詳細に検討するためには注意が必要である。

湖沼堆積物の場合にはタービダイト等による層序の乱れが考えられるが、底層での物質移動が少ない地点では連続的な記録が保持されている可能性がある。そこで世界最古そして最深といわれているバイカル湖の湖沼堆積物について考えてみよう。バイカル湖の研究が国際的に開放されたのは旧ソ連時代の1989年である。1991年より日本も参加しているバイカルドリリングプロジェクト(BDP)を中心としていくつかの湖沼堆積物の掘削が行われてきた。いずれも地球環境変動に関する新たな知見を含んだ貴重な記録であるが、ここではタービダイト等の影響を受けにくい湖嶺部で採取されたものをいくつか紹介しよう。まずそれほど長期の記録ではないが、解像度が高い詳細な分析が行われた過去25万年間の資料を見よう(図3)。この記録と琵琶湖の記録そして日射量変動の資料を比較するとよく分かることだが、基本的な変動はいずれも同調しており、この期間の気候変動には日射量変動が先導的な役割を果たしていることが伺える。さらに、バイカルの記録を詳細に眺めれば、酸素同位体ステージ5d(11万年前前後)および7d(23万年前前後)の時期には日射量の変動に直接対応するような急激な落ち込みがあることが分かるであろう(図3)。これらのことはこの地域が日射量変動に敏感であるという先の指摘を支持している。このバイカル湖の変動にも先に琵琶湖

の資料で述べた三つの軌道要素に対応する周期も明瞭に刻まれている。

次に第四紀(現在より約180万年前)を完全に覆う1996年に採取されたBDP96の結果について報告しよう(16)。約250万年に相当する100mコアと約500万年に対応する200mコアの2本が採取された。200mコアは下部に欠測部があるが、100mコアはほぼ100%回収され、過去約250万年の連続的な記録が得られているので、それを紹介しよう(図4)。約70-80万年前や約160万年前に大きな気候の変動が見られること、10万年前後、4万年そして2万年前後の周期が存在すること、そして70-80万年以降は10万年周期が卓越し、それ以前は4万年の周期が大きくなること等は全球的な気候変動と対応しているが、ここでの特徴の一つは離心率の周期の中で最も大きい40万年が明瞭に認められることである(図5)。離心率に関係するとされている10万年周期(厳密には12.4万年と9.5万年)と同時に見つかったことは10万年周期が離心率と関係していることを示唆している。

もう一つはこれまでに得られている最長のもので1000万年を超す記録が刻まれている1998年に先の試料とほぼ同様の地点で採取されたもの(BDP98)である(17)。これには実に多くの記録が残されており、これまでに海洋底堆積物から報告されていた多くの事件のほぼすべてが網羅されている。

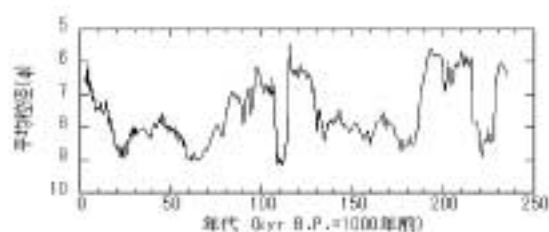


図3. バイカル湖10m湖沼堆積物試料(VER97)の分析結果(平均粒径の変動)。約11万年前(酸素同位体ステージ5d)と23万年前(7d)における急激な落ち込み(温暖期中の急激な寒冷化)に注意。

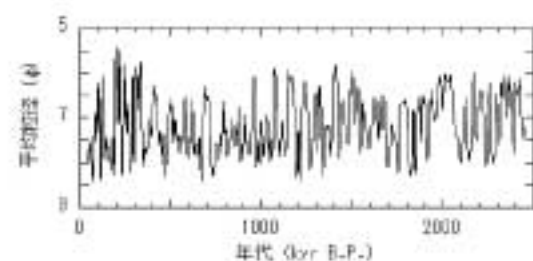


図4. バイカル湖100m湖沼堆積物試料(BDP96)の分析結果(平均粒径の変動)。粗粒化(ϕ スケールが小)が温暖化を示し、その逆は寒冷化を示す。

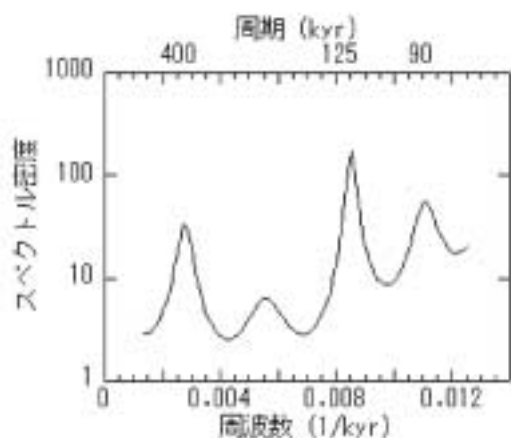


図 5. 平均粒径の変動に含まれる卓越周期。軌道要素のうち離心率に関係すると考えられる約 41 万年と 12.4 万年、約 9.5 万年の周期が認められる。

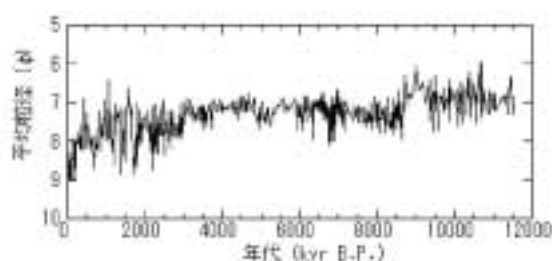


図 6. バイカル湖 600m 湖沼堆積物試料 (BDP98) の分析結果 (平均粒径の変動)。8-9Ma における変化、5-6Ma 前後の変化、3Ma 前後の変化に注意。

例えば長期的な寒冷化、8-9Ma における気候の変化 (南西モンスーンの開始)、5-6Ma 前後の変化 (地中海の塩分危機)、4.0Ma 前後の変動 (北半球の氷河作用の開始)、2.8Ma の急激な寒冷化、そして 100 万年の長周期の存在) 等が示され (図 6) (18), その詳細な資料・解析は地球環境変動を検討するための基礎資料として極めて有効である。

3. 流域過程と湖 (池) 沼堆積物

地球表層部の物理環境の変化, 例えば土壌侵食や崩壊等による地形の変化は物質の移動・堆積環境に大きな影響をもたらす。下流部に湖沼等の堆積水域がある場合にはそこでの堆積物にその痕跡を残すことが既に多くの報告で知られている (例えば, Kashiwaya *et al.*, 1995) (19)。とりわけ, 湖沼一流域系のようないわば準閉塞系を考えた場合には流域内

での物理環境の変化と湖沼への堆積とのつながりがかなり明瞭になる場合が多く, 堆積物情報は流域内での現象の意味を明らかにするための有効な手がかりとなる。これは観測とその限界を超えた期間の記録を結合させるための重要なステップである。

湖沼堆積物情報, とりわけ各種情報の時系列はその周囲の環境変動の復元に用いられてきていることは周知の事実であるが, 地形や土地利用の変化の復元にも有効である。地形の変化は物質の移動 (土砂移動) を伴うものであるから, 地形環境やその変化に関する堆積物情報としては, まずその移動物質・移動量に関わる情報 (粒度等の物理量) が解析の対象となる。さらにその時間的な変化量を知るためには時間軸に関する情報が不可欠となる。もちろんのこと環境の変化に関係するものや物質の移動に関する場所的な情報の解析も必要であるが, 物理量や時間軸に関する試・資料の入手がこの種の研究の前提となる。それでは次にこのような物理量と時間軸の計測が行われた研究をいくつか取り上げてみよう。

(1) 地形改変と池沼堆積物

流域で地形改変が進行していた沈砂池・貯水池の堆積物を定期的に採取し, 水文気象観測と地形改変の進捗状況の計測, いわば変化しつつある地形と池沼堆積物の観測結果の分析・解析からそれらの関係を明らかにしようとした試みを紹介する (Kashiwaya *et al.*, 1997) (20)。対象とする地域は神戸市の地形改変地であるが, そこでの観測期間はおよそ 6 年間である。降水量や水位の観測は連続記録であり, 堆積物の計測は半月あるいは 1 月の解像度をもつが, 地形改変の変化量に関する観測精度は (約 1 年) それに対応していないので, ここではこの変化量の精度にそろえた 1 年単位の議論に限定する。改変が進行する流域内には沈砂地が設けられており, 下流端の貯水池には, 直接貯水池に流入するものを除けば, 細粒粒子だけが排出されている。図 7 は降水の影響を除いた, 集水域からの流入土砂量 (地形改変量の大きさ) と堆積物の平均密度の経年変化を示しているが, 大規模な地形改変が進行した初期とその後の規模の縮小に良く対応している。そしてここでの地形変化量は粒子密度の変化に反映している。改変地では植生や土壌層の削剥が行われ, その後植生の吹き付け等人工的な法面保護が行われる。従って, 改変の初期には鉱物粒子成分が増大し, その後減少することはこのような進捗状況に対応している。つまり, ここでは密度が地形変化の指標として有効であることが示唆される。

(2) 豪雨による地形変化と池沼堆積物

多くの人的・物的災害をもたらした神戸・六甲山系周辺における 1967 年の 7 月豪雨災害の痕跡が六甲

山系の池沼堆積物に記されていることは、これまでもいくつか報告しているが(19), その年代の推定は核実験の放射性核種(Cs-137)の変動に基づいている。図8に示される池沼堆積物の粒度変動において、最下部が1938年前後と考えられていたため、その中央部(約19cm)に見られる粗粒化が1967年の7月豪雨時と解析の初期においておいては推定された(柏谷ほか, 1988)(21)。この推定はその後のCs-137濃度の変動とも矛盾しない結果をもたらし、豪雨による崩壊・土石流等の現象が堆積物にも反映していることが明らかにされた(19)。図中の矢印はCs-137濃度のピークを示すが、大気中の核実験の最盛期に当たるおよそ1963年に対応している。

金沢における記録的集中豪雨は1964年の7月に発生している。この7月には観測史上最大の日降水量と3番目の日降水量が記録され、金沢市や津幡町で山崩れや河川の氾濫が見られ、大きな災害となった(石川県, 1993)(22)。このときの最大の月間降水量の分布域において、いくつかの池沼の堆積物を調べてみた。その中で、大谷地上池の中央部で採取された堆積物の粒度分析の結果を図9に示すが、Cs-137濃度のピーク(約25cm)の直後に大きな粗粒化が起きており(約22cm)、1964年の記録的豪雨と対応している。

これらの年代推定に利用されたCs-137は人工放射性核種であり、1950年代初頭より繰り返された核実験起源のものであり、大気からの降下量は1963年にピークとなっている。この大気降下量の変動が湖沼堆積物にどのように反映するかは、直接湖沼に降下したもののほかに、流域に降下したものが雨水流等による再移動の過程を経て堆積する場合も考える必要があり、必ずしも降下量のパターンが堆積物のCs-137濃度変動パターンに対応するとは限らない。1986年に発生したチェリノブイリの事故によるCs-137の増加も大気降下量の増大をもたらし、半減期の更に短い(2.07年)Cs-134とともに新たな年代として利用されたが(例えば Appleby *et al.*, 1993)(23), わが国では降下量がそれほど多くはなかったため、新たな基準年代(鍵層)として利用されたことはあまりないようである。



図7. 相対的な流入土砂量の変動(点線)と堆積物中の粒子密度の変動(実線)。流出土砂量は地形改変量に対応している。

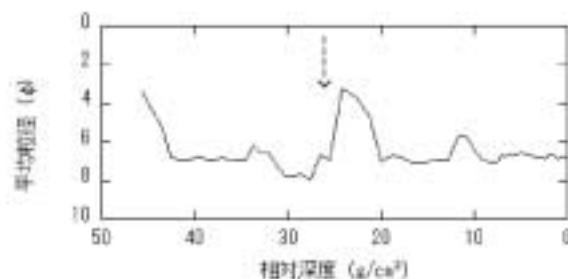


図8. 池沼堆積物のコア試料の解析結果(平均粒径の変動, 神戸). 相対的深度は池底面(0;1999年)からの深さ, 矢印はCs-137濃度のピーク(1963年)を示す。

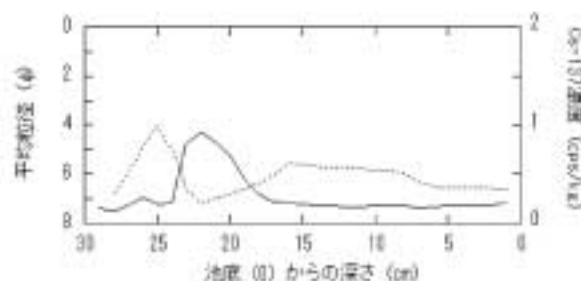


図9. 池沼堆積物のコア試料の解析結果(金沢). 平均粒径(実線)とCs-137濃度(点線)の変動。池底面(0)は1996年, Cs-137濃度(点線)のピーク(約25cm)は1963年を示す。

(3) 環境同位体を利用した流域環境の変動と湖沼堆積物

地表部の環境変動は物理・化学特性の変動として堆積物に刻まれているが、環境同位体の変動にも認められることがある。例えば半減期が22.1年であるPb-210の利用は近年の年代測定法として有効であるが、土砂移動に対応する堆積環境の変動も示すことがある。図10は琵琶湖の堆積物に刻まれた豪雨(1896年の明治大豪雨と1959年の伊勢湾台風)を示しているが、Pb-210の一定の減衰における擾乱として現れている(太井子・柏谷, 1993)(24)。サンプル採取年と半減期から推定される年代およびPb-210濃度勾配の変化や乱れから1959年の伊勢湾台風時および1896年の明治大豪雨が認められる(図中の二カ所の破線部)。これは密度流あるいは乱泥流による堆積速度の急激な増加を反映していると考えられる。図11は余呉湖のコア試料におけるPb-210の鉛直変動であるが、1959年のダム化工事による導水路の設置による堆積速度の変化が明瞭に認められる。即ち、この時を境に流入水の集水面積の増大とともに堆積速度が急増している(寫田ら, 2002)(25)。

参考文献

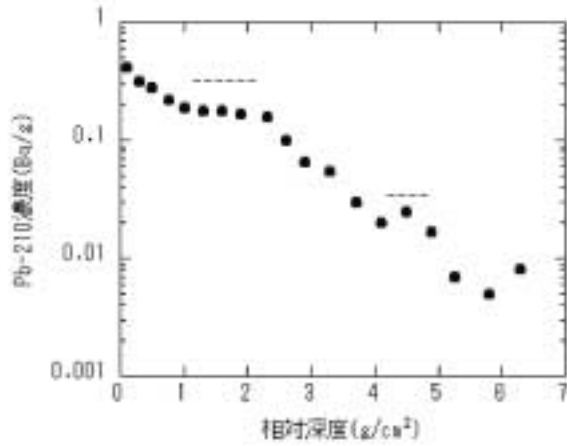


図 10. 湖沼堆積物（琵琶湖）のコア試料の解析結果（Pb-210 濃度の変動）。破線部（1-2）および（4-5）はそれぞれ伊勢湾台風（1959 年）および明治大豪雨（1896 年）に対応。

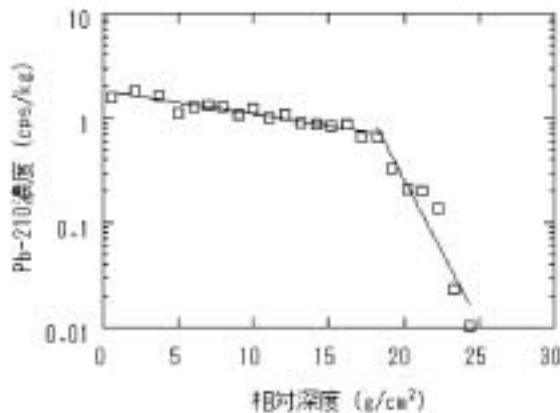


図 11. 湖沼堆積物（余呉湖）のコア試料の解析結果（Pb-210 濃度の変動）。深度約 18 のところに見られる急速な変化は堆積速度の急変を意味する（人工的な流域の改変（1959 年）に対応）。

- [1] J. Van Couvering, *The Pleistocene Boundary and the Beginning of the Quaternary*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [2] W.F. Ruddiman and J.F. Kutzbach, "Plateau uplift and climate change", *Scientific American*, Vol.264, pp.66-75, 1991.
- [3] P. Mann and J. Corrigan, "Model for late Neogene deformation in Panama", *Geology*, Vol.18, pp.558-562, 1990.
- [4] G.H. Haug and R. Tiedemann, "Effect of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation", *Nature*, Vol.393, pp.673-676, 1998.
- [5] X. Xiao and T. Li, "Tectonic evolution and uplift of the Qinghai-Tibet Plateau", *Episodes*, Vol.18, pp.31-35, 1996.
- [6] S. Horie, *Lake Biwa*. Dr. W. Junk, Dordrecht, 654p. 1984.
- [7] K. Kashiwaya, K. Fukuyama and A. Yamamoto, "Time variations in coarse materials from lake bottom sediments and secular paleoclimatic change", *Geophysical Research Letters*, Vol.18, pp.1245-1248, 1991.
- [8] P.A. Meyers, K. Takemura and H. Horie, "Reinterpretation of Late Quaternary sediment chronology of Lake Biwa, Japan, from correlation with marine glacial-interglacial cycles", *Quaternary Research*, Vol.39, pp.154-162, 1993.
- [9] M. Milankovitch, *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*, Königlich Serbische Akademie, Bergrad, 633 p., 1941: (日本語訳; 柏谷健二・山本淳之・大村誠・福山薫・安成哲三, 気候変動の天文学理論と氷河時代 古今書院, 610p., 1991).
- [10] 安成哲三・柏谷健二(編), *地球環境変動とミランコヴィッチサイクル*, 古今書院, 1992.
- [11] Short, D., Mengel, J.E., Crowley, T.J., Hyde, T.H. and North, G.R., "Filtering of Milankovitch cycles by Earth's Geography", *Quaternary Research*, Vol.35, pp.157-173, 1991.
- [12] T. Liu (ed.), *Loess, environment and global changes*, Science Press, 288p. 1991.
- [13] T. Liu, Z. Ding and N. Rutter, "Comparison of Milankovitch periods between continental loess and deep sea records over the last 2.5 Ma", *Quaternary Science Reviews*, Vol.18, pp.1205-1212, 1999.
- [14] Z.L. Ding, S.F. Xiong, J.M. Sun, S.L. Yang, Z.Y. Gu and T.S. Liu, "Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai, Loess Plateau, north-central China and the implications for paleomonsoon evolution", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleogeology*, Vol.152, pp.49-66, 1999.
- [15] Z. T. Guo, W.F. Ruddimann, Q. Z. Hao, H.B. Wu, Y.S. Qiao, R.X. Zhu, S. Z. Peng, J.J. Wei, B.Y. Yuan and T. S. Liu, "Onset of Asian desertification by 22Myr ago inferred from loess deposits in China", *Nature*, Vol.416, pp.159-163, 2002.
- [16] K. Kashiwaya, M. Ryugo, H. Sakai and T. Kawai, "Long-term climate-limnological oscillation during the past 2.5 million years printed in Lake Baikal sediments", *Geophysical Research Letters*, Vol.25, pp.659-663, 1998.
- [17] K. Kashiwaya (ed.), *Long continental records from Lake Baikal*, Springer, 380p. 2003.
- [18] K. Kashiwaya, S. Ochiai, H. Sakai and T. Kawai, "Orbit-related long-term climate cycles revealed in a 12-myr continental record from Lake Baikal", *Nature*, Vol.410, pp.71-74, 2001.
- [19] Kashiwaya, K., Okimura, T., Kawatani, T., Aoki, T. and Isozumi, Y., "Landslide environment and pond sediment information" In: *Steepland Geomorphology* (O. Slaymaker ed.), Wiley and Sons, Chichester, p.63-71, 1995.
- [20] Kashiwaya, K., Okimura, T. and Harada, T., "Land transformation and pond sediment information: Earth Surface Processes and landforms", Vol.22, pp.913-922, 1997.
- [21] 柏谷健二・太井子宏和・川谷健・沖村孝, "六甲山系の湖沼堆積物の粒度組成の変動と崩壊環境", *地形*, Vol.9, pp.193-200, 1988.
- [22] 石川県, *石川県災異誌*, 石川県, 215p. 1993.
- [23] Appleby, P.G., Richardson, N. and Smith, J.T., "The use of radionuclide records from Chernobyl and weapons test fallout for assessing the reliability of Pb²¹⁰ in dating very recent sediments", *Verh. Internat. Verein. Limnology*, Vol.25, pp.266-269, 1993.
- [24] 太井子宏和・柏谷健二, "琵琶湖湖底堆積物の堆積異常", *月刊地球*, No.8, pp.123-127, 1993.
- [25] 葛田敏行・柏谷健二・兵頭政幸・増沢敏行, "余呉湖・湖沼堆積物解析から推定される後期完新世の湖沼一流域系水文環境変動", *地形*, Vol.23, pp.415-431, 2002.