東アジアの湖沼―流域系における地表プロセスと環境変動

柏谷健二

1．はじめに

私たちは現在、これまでの観測記録に残されていないような、大きな自然と人為的環境変動に直面している可能性がある。一般に局所的な短期の変動は、比較的容易にその因果関係を見出しやすいが、地球規模の大きな環境変動は複雑な因子が絡み合っているために、その因果関係を明らかにすることはそれほど容易なことではない。ミランコヴィッチサイクルで知られる長期の氷期・間氷期サイクルのような変動についてはある程度の因果則に対応する関係は知られているが、一般に過去の変動に関しては、因果関係を明らかにすることは困難である。

現在のところ、私たちは小氷期終了後の温暖期の観測資料を利用することは可能であるが、それ以前の観測資料の利用は多くの場合不可能である。殆ど唯一に近いであろう小氷期の観測資料としては、旧朝鮮総督府観測所の和田博士の復元した朝鮮王朝時代のソウルの記録が特筆される。しかしながら、現在のように大きな環境レジームの変化が想定される場合にはその時の環境変化の定量的な予知・予測という観点から、中世温暖期、小氷期、小氷期以降の温暖期等のように異なるレジームにおける“観測”記録の存在は不可欠である。議論すべき重要な課題の一つには、レジームが変更した場合における外力（例えば、降水等による浸食力）に対応する地表環境の応答である。しかしながら、現在のところ外力の応答に関係する資料は、測器による観測時代の限られた期間のものだけである。

異なったレジームにおけるその反応に関する殆どの資料は過去の代替試料にだけ残されている。“高解像度”の試資料の入手が模索され始めてからそれなりの期間が経過しているが、定量的な予知・予測に利用可能な資料としてどの程度確立しているものなのであろうか。大気に関わるものでは樹木や雪氷・氷床堆積物の代替記録からそれなりに分解能の高い資料が蓄積されてきており、レジームの相違が徐々に明らかにされてきている。しかしながら、現在とは異なったレジームにおける変動に対する地表部の応答は、多くの場合定性的な資料蓄積の段階に留まっているようである。例えば気温の上昇は植生の活性化と関係しているが、花粉等の植生情報を気温の代替試料として利用する場合には、変換関数の導入のみならず、観測資料に基づく裏付けが不可欠である。つまり、代替試料が定量的資料として利用可能になるためには、“観測”による検証が必要なのである。高解像度の資料確立のためには、測器による観測時代の制約を超えた資料、いわば観測の限界を超えた資料の確立が必要であり、“観測”による検証を経た代替試料の資料化が要請されているのである。

さて、地表の物理環境を研究対象とする地形学であるが、地形学が地球科学のなかで特筆す



PROFILE
柏谷健二
（かしわや　けんじ）
金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授
専門：地形学・陸水物理学

べき特徴の一つは「現在」を科学する部分と「歴史」を科学する部分の二つを不可分なものとして含んでいることにある。おおまかにはプロセス地形学（営力論）と発達史地形学（地形発達史）と呼ばれる分野が対応し、それぞれ「微分」的な研究と「積分」的な研究を主要な対象としている。観測も測定に大きな役割を果たす「現在」科学としてのプロセス地形学と観察がその契機となる場合が多い「歴史」科学としての発達史地形学の統合化を目指した総括的な研究はいくつか考えられるが（例えば、地形変化の定量的な予知・予測）、多くの場合、致命的な問題点の一つは、現在の観測記録と過去の記録の接続の困難さ、とりわけ過去の定量的な記録が決定的に不足していることである。つまり観測の“限界”を超えた資料の必要性はこの分野の進展にも内包されている。

ここでの主題と重なるのであるが、この問題点を克服するための試みの一つは、湖沼－流域系の地形学（陸水地形学）の確立である。各種地形現象が生起する場所では観測施設がないのが普通であるが、この地形学では湖沼－流域系を地域の一つの代替観測所として活用する。この場合には、系内に設置される各種の測器とともに湖沼－流域系自体も“測器”であり、堆積物は“記録紙”である。湖沼－流域内の短期的なプロセスを測器による観測等で明らかにすると同時にそのプロセスが湖沼－流域系という“測器”に記録されるメカニズムを解明する。そしてその記録された試料（各種代替指標）と測器による観測記録の比較検討を行い、その定量的関係の確立（資料化）を進める。これは、観測時代の代替指標（堆積物）と測器による観測記録の比較検討を経て、代替指標から観測時代以前の変動を推定し、関連する各種記録（観測記録、古文書等）で検証し、資料化に至る手続きに繋がる。時間軸の大小は“記録紙”の長さに依存し、資料の信頼性は検証記録の精度に関わることになるが、湖沼－流域系という代替観測所の記録は原理的に過去の地形プロセスの推定そしてメカニズムの解明の手掛かりとなる可能性を示している。もちろん、記録紙に刻まれた環境情報の解読には、適切な資料の補間（内挿、外挿等）、フィルタの作成等が不可欠である。また、検証不可能な情報も多く含まれ、数値実験による検証に留まる場合もあり、実際の研究の進捗には多くの困難が伴っている。しかしながら、これはレジームの変更を超えて今後の環境変化の予知・予測を進めるための出発点であろう。

本稿では、上述の考え方を基本に、測器による観測時およびそれ以前の時間軸を対象とし

て、湖沼－流域系を利用した外力の変化に対する地表の物理環境の応答を明らかにするための試みのいくつかを取り上げる。

2．東アジアと日本の立地条件

湖沼の環境はその集水領域である流域条件と不可分である。例えば、氷河で覆われた地域の多くの湖沼では、夏季に流域での融氷水による浸食や運搬を通して水や土砂が供給される。ここでは、気温の高さが融氷を促している。一方､氷雪が殆ど認められない温暖湿潤地域では、湖沼は流域の雨量に大きな影響を受ける｡即ち、ここでの水や土砂等の供給量は気温よりも雨量強度に関係している。流域における地震が関係する地すべり・崩壊等の土砂生産も湖沼への供給量に関係してくる。また、近年の活発な人間活動は対応する流域環境に大きな影響をもたらし、流域内生産物質の集積場である湖沼にも急速な環境の変化を促し、その変化は湖沼堆積物にも記録されている。そして、これは湖沼－流域系は自然と人為的環境変動の議論には適切な単位であることを意味している。

さて、中緯度に位置する東アジアは偏西風の影響を受けるばかりではなく東アジアモンスーンにも支配される。冬季にはシベリヤ－モンゴル地域から発達する高気圧が中国東北部、韓国、日本を含む東アジアに寒気をもたらす。また夏季モンスーンは日本や韓国はもとより中国東北部にも影響をもたらす。春季には偏西風が関係する大量の風成塵（黄砂）が、中央アジアや中国西部から中国東北部、韓国、日本に運ばれる。また、西暦947年冬の白頭山（中国と北朝鮮の国境付近）の大噴火の広がりにも偏西風が関係していた可能性があり、中国東北部・北朝鮮北部に大きな被害をもたらすとともに東北日本にも大量の火山灰を運んでいた。このように、これらの地域での気候や環境は相互に密接に関係している｡即ち､これらの地域は個々の気候要素に系統的な差異はあるが、似たような気候条件下にある。このことは誘因としての水文気候事象に関係する諸災害に対して、代替資料と観測資料のいずれもが、三国に共通の対策と個別の対策に活用できることを示している。また､災害の素因としての地形構成材料は、日本は変動帯のものであり、中国東北部・韓国は安定帯のものである。この相違は似通った外的条件下における地表部の反応の相違を考える上で重要である。さらに、特筆すべき中国、韓国、日本に共通したこの地域の優位性は古くからの文書記録（王朝の記録や日記等）が残されているということ、つまり代替資料として古文書の利用が可能なことである。これは他の代替試料の検証、代替試料の資料化のために有力な手掛かりを与えることになる。

3．水文環境のレジームシフト

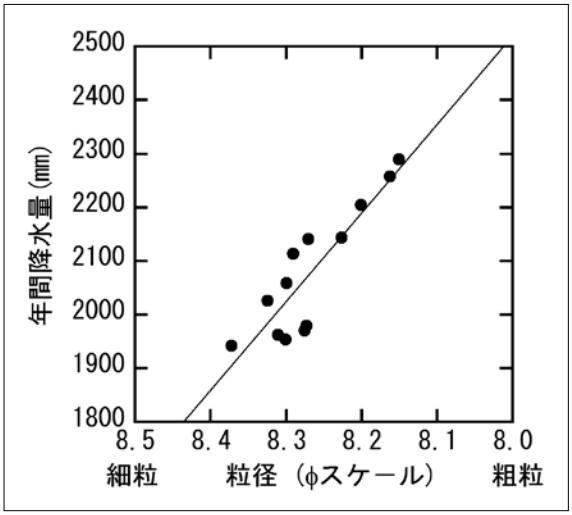
現在私たちの研究グループは中国東北部豆満江流域、韓国中央部・北部のいくつかの湖沼

－流域系で中国（延辺大学）、韓国（韓国地質資源研究院・慶熙大学）と共同調査を進めているが、ここでは、調査が進んでいる日本の湖沼－流域系、琵琶湖の北部にある余呉湖の例を取り上げよう（嶌田他、2002等参照）。余呉湖が含まれる琵琶湖流域は、日本海側の若狭湾から北西気流、大阪湾からの南西気流、伊勢湾からの南東気流が流入し、北陸型、瀬戸内型、東海型の各気候区が重なり合う地域であり、その変化が水文環境の変動にも鋭敏に対応し、湖沼堆積物に記録されていることが期待できる。余呉湖は日本最古の羽衣伝説（近江国風土記）の残されている湖であるが、湖水面は海抜132.8mであり、北岸を除く三方を賤ヶ岳等の山に囲まれている。また、長らく直接の流出河川を持たない準閉塞湖であったため、湖底堆積物には流域の環境情報が連続的に記録されてきたと考えられている。しかし、1959年に完成した洪水調節を目的とした余呉湖ダム化事業のため、余呉川との導水路が完工し、水の出入りが人為的に管理されるようになった。このため、湖沼－流域系の物理環境がその前後ではかなり異なることになった。このことは余呉湖の堆積速度が完工後では3倍程増加していることが堆積物の分析結果から示され、人為的な環境変動が堆積物という記録紙に刻まれていることがわかる。

湖沼堆積物の採取や流域での調査の狙いは主としてこれまでの環境変動の解明にあるが、ここでは余呉湖-流域系では代替試料を用いた観測時代の水文環境（降水・土砂移動環境）の解明（代替雨量計という“測器”の制作）、そしてその観測時代以前への拡張に焦点を当てることにする。代替資料作成のために湖心中央部で採取した数本の堆積物試料が用いられた。何が降水量（雨量）の代替指標になるかということは大きな問題であるが、ここでは地形変化（土砂移動）という観点から粒度（粒径）という物理量を取り上げることにする。湖沼堆積物は一般的に流域起源の鉱物粒子と有機物質、湖内起源の無機物質（例えば生物起源シリカ）と有機物質に風成塵降下物、続成作用生成物質などが加わったもので構成される。この中で流域における侵食、運搬といった水文地形プロセスを反映するものは、主として鉱物粒子の物理量である。しかし、堆積物全体の粒度分析では、湖内で生産される生物起源シリカや有機物質の量が多い場合にそれらの影響を受け、粒径の大小が流水の状況（流域の物質移動環境）を直接反映していない場合が考えられる。そこで本研究では、生物起源シリカおよび、有機物質を除去した試料の粒度を測定し議論の対象とした。また、堆積物の時間軸は議論のための大前提であるが、ここではCs-137法、Pb-210法そしてC-14法を用いている。

図1は1896年から導水路が完工する1960年までの余呉湖に近い彦根地方気象台の年間降水量の変動（冬季の降雪を含む余呉湖での記録で補正したもの、5年平均）と対応する年代が与えられた堆積物の平均粒径を比較したも

図1　堆積物の粒径と降水量の関係



のであるが、降水量の多い時は粒径が大きくなり、降水量の大小と粒径の大小は極めてよく対応している。降水量の大小は浸食量・運搬量の大小に関係すると考えられ、粒度（粒径）は運搬（流送）プロセスと密接な関係がある。従って、一般的に水文量と粒度の関係は期待できるが、ここでの結果は、粒度が降水量の代替指標となることを示しており、回帰式の計算は“測器（雨量計）の製作”にもなっている。さて、この“測器”を用いて、それ以前の降水量を“測って”みよう。結果は図2であるが、1850年前後に全般的に降水量が減衰するという水文環境のシフトが認められ、小氷期の終了を示唆しているようである。それでは、この“測器”が観測以前、あるいは小氷期というレジームの異なる期間にも利用可能なものであろうか。先に、触れたように東アジアには小氷期の観測資料としては唯一に近い朝鮮王朝時代のソウルの降水量の記録が残されている。東アジアモンスーン域という大きな枠組みでは、ソウルの記録も彦根の記録も同じような変動傾向を示すことが予想されるが、観測時代の対応について確認しておこう。図3で示されるように、観測時代においては個々の年変動には相違はあるが、変動傾向は同様であることが認められる。つまり、余呉湖付近での変動傾向を検証するために、ソウルの観測記録が利用可能であることがわかる。それでは、それ以前での対応はどうか。

図2　過去400年の年間降水量の推定（実線）。破線は観測値（5年平均）。

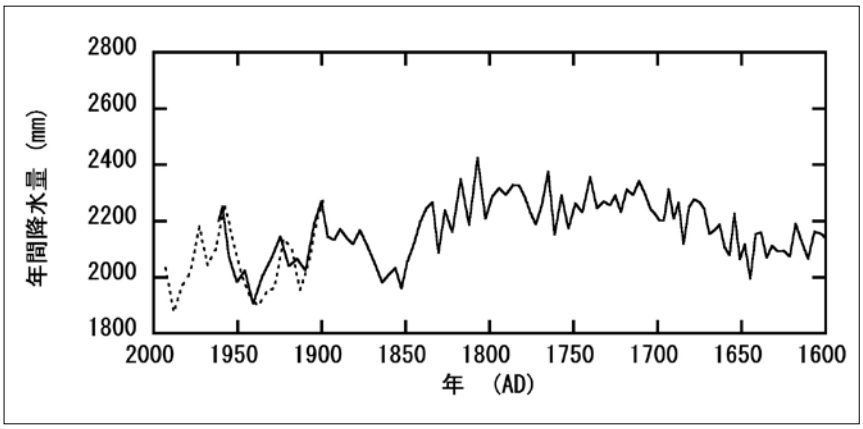


図4は1770年からのソウルでの年間降水量変動であるが、ここでも全般的に降水量が減少する水文環境のレジームシフトが1870年前後に明瞭に認められる。おそらくこれは韓国における小氷期終了に関係するものであろう。シフトの

時期の多少の相違は、今後大いに議論すべきことである。しかしながら、ここでの結果は余呉湖での代替試料に認められた小氷期の降水量は現在の観測時代よりも大きかったということを歴史的な観測資料の検証で確認したことになり、“測器”の有効範囲が過去数百年まで拡張可能なことを意味する。余呉湖での“測定値”は約2000年にも及ぶので、他の“代替観測資料”による検証が得られれば、測器の有効範囲は更に拡張される可能性があろう。

図3　彦根とソウルの年間降水量の比較。実線は彦根で破線はソウル。太い線は平滑化したもの。

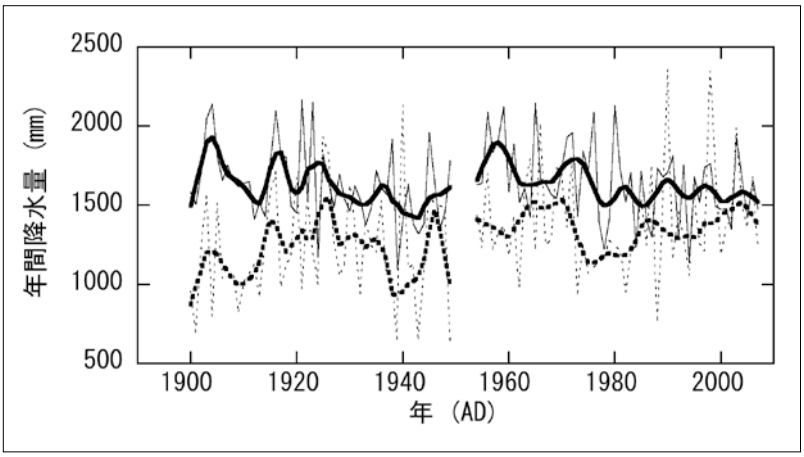
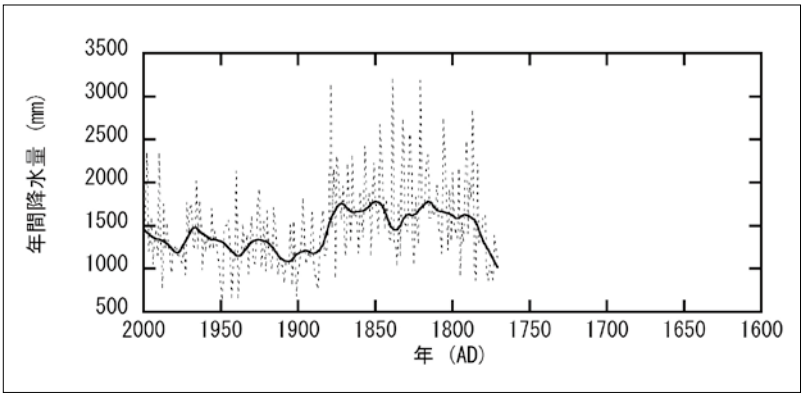


図4　ソウルの年間降水量（破線）。実線は平滑化したもの。



4．自然災害と湖沼－流域系

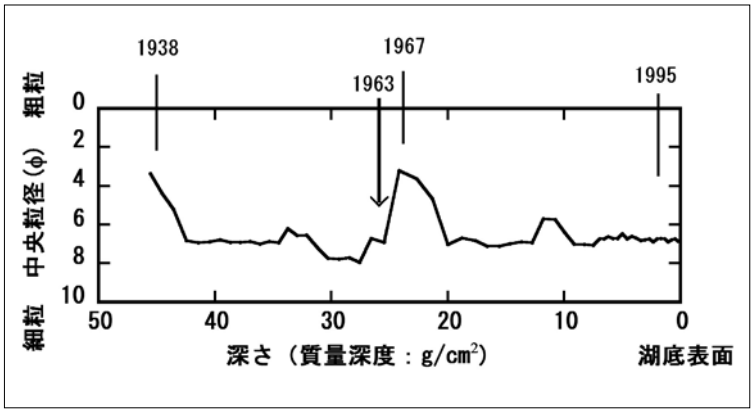
湿潤変動帯にある我が国では、豪雨や地震による自然災害が毎年繰り返すように発生している。これらに伴う地すべり・崩壊・土石流等の地表プロセス（土砂移動プロセス）は地形の変化そのものであるが、人間活動域と重なる場合には災害となり、人的・物的な被害をもたらし、防災の観点からも我が国では重要な研究の対象となっている。近年の自然災害に関しては膨大な調査・研究の蓄積があり、国や地方自治体の防災対策に資するものも多である。また、各種イベント堆積物から地震や津波を復元し、その周期性の検討を試みる研究も多く進められてきている。観測などによる履歴の明らかなイベント堆積物に関する議論ではあまり問題とならないが、我が国のような地震と豪雨のいずれにおいても土砂移動災害が発生する地域では、湖沼堆積物等に含まれイベント情報には十分な吟味（地震型､豪雨型等）が必要である。また、豪雨による土砂移動は地震による土砂移

動に比べ発生頻度が桁違いに多いので、湖沼など陸域での過去のイベント堆積物の解明（豪雨の周期や地震の周期に関係）にはプロセスの理解がその前提であろう。

1995年1月17日早朝に発生した阪神淡路大地震が未曽有の被災者を生み出したため、近年は神戸・六甲地域は地震の被災地として取り上げられることが多いが、それ以前は豪雨による土砂災害の被災地として防災関係者には著名であった。例えば、700名近くの死者・行方不明者を出し、谷崎潤一郎の「細雪」でも詳細に取り上げられている昭和13年（1938）の阪神大水害、100名近くの死者・行方不明者を出した昭和42年の７月豪雨災害である。筆者も地震以前から六甲山系の獺池とその流域で水文環境の変動と土砂災害の研究を行っていたが、地震直後に池底にセディメントトラップを設置し、堆積物の定期的な回収と流域の調査を進め、その後の経過を観測してきたので、ここでは、豪雨による土砂移動・堆積プロセスと地震によるそれとの相違に簡単に触れ、その後の経過について報告する（Kashiwaya et al., 2004 参照）。

図5は地震後の1999年に採取したコア試料の粒度分析結果である。太い矢印はCs-137濃度の測定から1963年と推定されたところなのでその上部にある粗粒部は1967年の豪雨災害時の堆積物に対応している。また、最下部の粗粒部は1938年の豪雨災害時のものと考えられる。ところが、コア試料の粒度で1995年に対応する部分（約2g/cm）でははっきりした変化は認められず、また観測結果（セディメントトラップ試料）からもコア試料と同様の粒径が細かく変動している様子が伺える程度である。つまり、豪雨災害時の土砂移動は比較的粒径の大きいものが流入・堆積するが、地震の場合には堆積物の粒径には顕著な変化が認められない。しかしながら、観測結果から得られる堆積速度は地震直後に急速に増加し、その後徐々に減少する（図6）。つまり、地震時には流域内で大量の細粒土砂が生産され、降雨のたびに池沼に運搬され堆積してきたと考えられるのである（図7）。そして、およそ５年後には比較的安定した堆積速度に近づいてきており、新たな定常状態が形成されつつあるようである。図で示されるように、地震後の堆積速度は降水量に対応しており、地震時に生産された粗粒土砂と今後の豪雨時におけるそ

図５　神戸・六甲山系・獺池の堆積物の粒径変化。



れらの移動の問題が今後の課題として残されよう。

ここでの結果は、湖沼－流域系の調査・観測から、堆積物という“記録紙”に刻印される豪雨と地震は識別されること、豪雨と地震の頻度は一般にかなり異なるので長期の“記録紙”を解読する場合には他の記録との比較が不可欠であることを示唆している。一般的な言い方をすれば、過去の記録（代替試料）、特に長期の記録を将来の変動予測に資するものとするためには、観測等によるプロセスの正確な理解と検証が必要であること、このためには同一の“観測所”で過去の記録と現在の記録が同一の“記録紙”に記録されることが肝要であることが示されている。そしてこの“観測所”（代替観測システム）として、湖沼－流域系は最も適切なものの一つであることが理解されよう。

図６　神戸・六甲山系・獺池の年間堆積速度の変化。

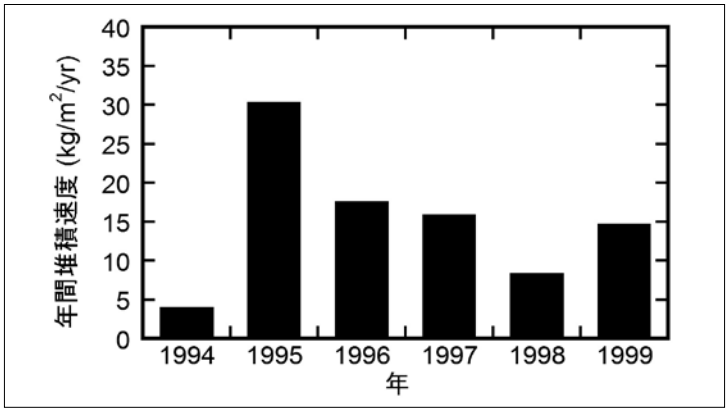
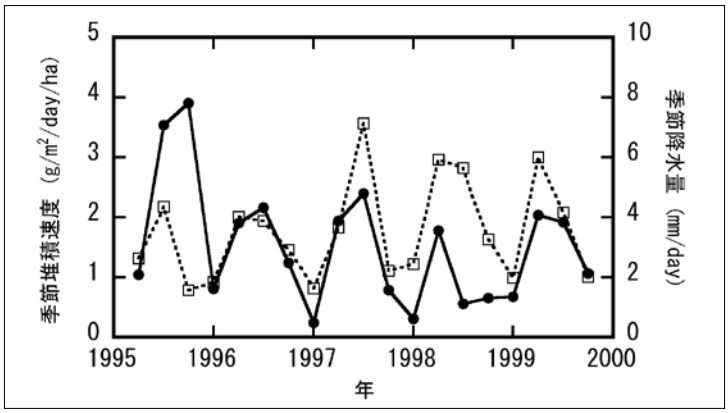


図７　獺池の季節堆積速度（実線）と神戸の季節降水量（破線）の変化。



参考文献

朝鮮総督府観測所（1917）朝鮮古代観測記録調査報告、200頁

嶌田敏行・柏谷健二・兵頭政幸・増沢敏行（2002）余呉湖・湖沼堆積解析から推定される後期完新世の湖沼－流域系水文環境変動, 地形, **23**, 415-431

Kashiwaya, K., Tsuya, Y., and Okimura, T.（2004）Earthquake-related geomorphic environment and pond sediment information, Earth Surface Processes and Landforms, **29**, 785-793.