

地表環境の変動と湖沼堆積物情報の解析

柏谷 健二*

Lake Sediment Information and Changes in Geomorphological Environment

Kenji KASHIWAYA *

Abstract

Landform changes in lake-catchment systems may give a great insight into clarifying the relationship between geomorphic processes and geomorphic histories. Tracers and dating tools for mass movement (physical properties, Cs-137 and Pb-210_{exc}) are inevitable in these studies; changes in physical properties and Pb-210_{exc} concentration of sediments are closely related to geomorphic changes, Cs-137 concentration in surface layers is connected to surface erosional processes and Pb-210_{exc} and Cs-137 of lake sediments are available for sediment dating. Short-term observation and analyses in the systems reveal some relationship between the processes and sediment information, suggesting clues to find long-term causal relations in landform evolutions.

Key words: *lake-catchment system, lake sediment information, environmental isotope*

1. はじめに

地表の物理環境の変化、とりわけ土壌侵食や崩壊等による地形の変化は下流部の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、柏谷ほか、1988；Kashiwaya et al., 1995）。とりわけ、湖沼－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地形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。これに関連して筆者は先に「流域における地形環境の変動と湖沼の堆積過程」という報告（柏谷、1996）でいくつかの考え方を示したが、具体的な資・試料に関する議論あるいはその

2001年4月1日受付, 2002年1月9日受理

* 金沢大学自然計測応用研究センター

* Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa 920-1192, Japan

分析や解析に関する議論はあまり取り上げなかった。しかしながら、近年の地球科学における年代測定も含めた測定手法の新たな開発や導入は地形学においても大きな影響を及ぼしつつあり（例えば、Geomorphology の特集号，Harbor 編「Cosmogenic Isotope in Geomorphology」，1999），湖沼－流域系の研究においても有効な手法がいくつか導入されている（太井子・柏谷，1993，Kashiwaya et al., 1995）。

地形学が地球科学のなかで特筆すべき特徴の一つは「現在」科学的側面と「歴史」科学的側面の二つを明示的に含んでいることであろう。言葉を変えれば微分的な研究と積分的な研究のいずれもが対象となる。営力論（プロセス地形学，動的地形学）や地形発達史と呼ばれる分野が，必ずしも 1 対 1 の対応ではないが，第一近似的にそれぞれに関係する。1960 年代における理論地形学の一つの出発点となった物質移動を表現する微分方程式とその積分形である地形の関係は（例えば Scheidegger, 1961；1970；1991），十分な議論が尽くされていないが，この種の考え方を定式化する一つの端緒になったと思われる。

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」科学としての地形発達史の結び目の一つには湖沼－流域系の地形学が考えられるであろう。短期的な地形の変化は観測等の手法によって追跡できるが，長期的な変化については一般に各種の観察・計測から推定することになる。この推定の精度は対象が時間的・空間的に拡大すればするほど当然ながら粗くなる。この精度の向上には外的営力・内的営力および地形構成材料の物性に関する知見の精度が関係する。議論を侵食地形に限定するならば侵食の進行は主として雨水等の侵食力としての外的営力と風化の程度に関係する侵食可能層の大小に規定されるが，侵食力を加減する傾斜や集水性の大小，抵抗力に関わる植生の存在等も重要になってくる。豪雨時の崩壊等による比較的大きな地形変化を観測でき，そのときの物質（土砂）収支を明らかにできるのであれば，それは地形変化における定量的な時系列を明らかにすること，即ち過去および未来の推定の第一歩となる。

湖沼－流域系の地形学では湖沼堆積物あるいは流域の表層土を利用することにより過去に敷衍してこの種の情報を入手できる可能性がある。湖沼堆積物に記録された情報と地形環境やその変化を結びつける試みはこれまでも行われ（例えば McManus and Duck, 1993），筆者もいくつか報告している（柏谷ほか，1988；Kashiwaya et al., 1995）。また，観測に基づいた地形の時系列変化と堆積物の変化に関する報告も行っている（Kashiwaya et al., 1997）。もちろんのこと現時点でのこれまでの報告では，その対象とする空間的・時間的範囲は限定され，これからさらに試行を重ねる必要があるが，今後の展開を考え，本稿ではいくつかの例を紹介し，議論する。

2. 湖沼堆積物情報

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（例えば Foster et al., 1990; Davit et al., 1998）。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。さらにその時間的变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)。対象とする地域は神戸市西区の地形改変地であるが、そこでの観測期間はおおよそ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池が設けられており、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。Fig. 1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

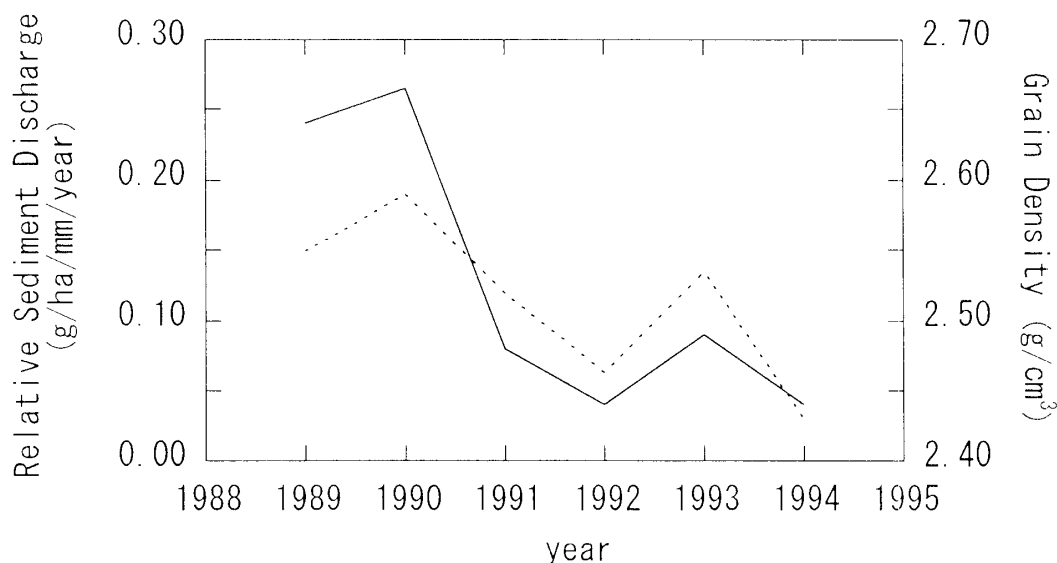


Fig. 1. (a) Relative sediment discharge (solid line) (sediment discharge divided by rainfall) from the catchment area where landtransformation was proceeding and (b) annual change in grain density of pond sediment (dotted line).

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(柏谷ほか, 1988; Kashiwaya et al., 1995), 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。Fig. 2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19 cm)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推定された(柏谷ほか, 1988)。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(Kashiwaya et al., 1995)。図中の破線中央部約21-22 cmに認められるCs-137濃度のピークはおよそ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)。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Fig. 3に示すが、Cs-137濃度のピーク(約25 cm)の直後に大きな粗粒化が起きており(約22 cm)、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(Fig. 4)。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

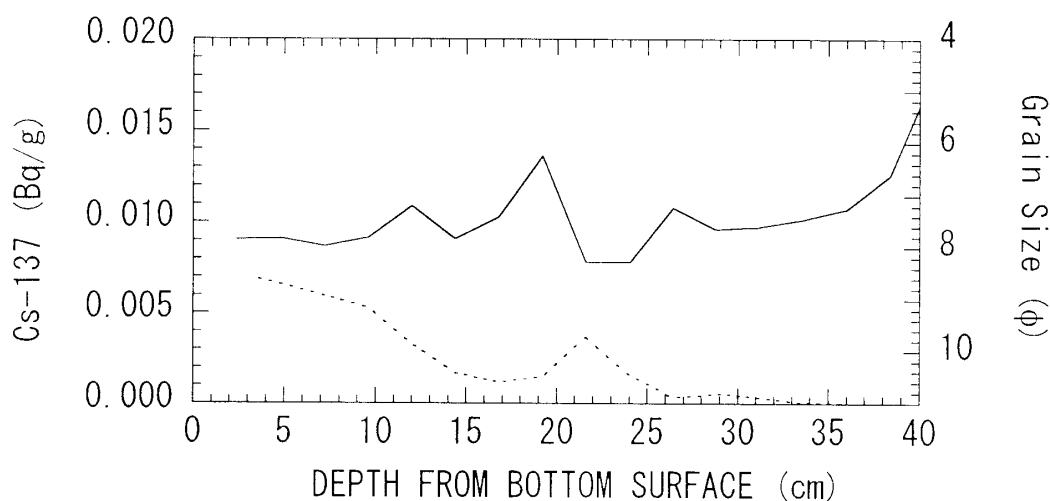


Fig. 2. Change in (a) grain size (solid line) and (b) Cs-137 concentration (dotted line) of pond sediments from Kawauso-ike in the Rokko Mountains, Kobe.

下したもののほか、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 (de Roo, 1991; Appleby et al., 1993), 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) として利用されていることはあまりないようである。

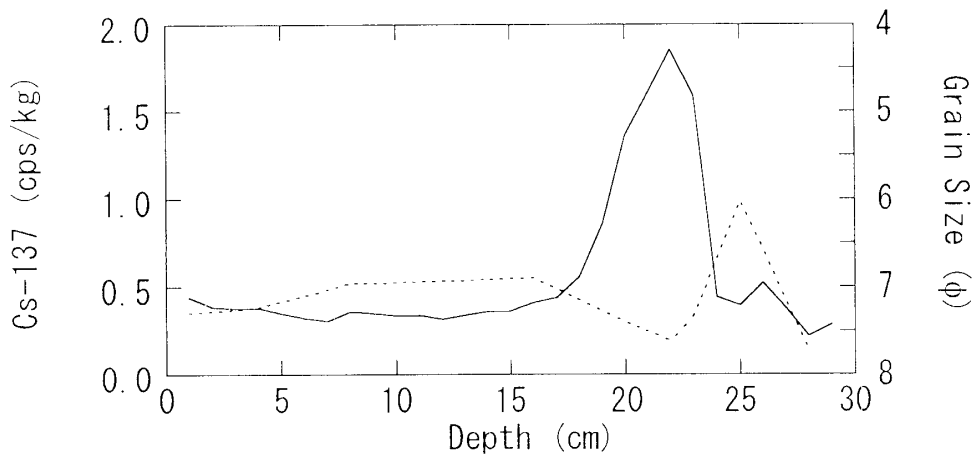


Fig. 3. Change in (a) grain size (solid line) and (b) Cs-137 concentration (dotted line) of pond sediments from Oyaji-kami-ike in Kanazawa.

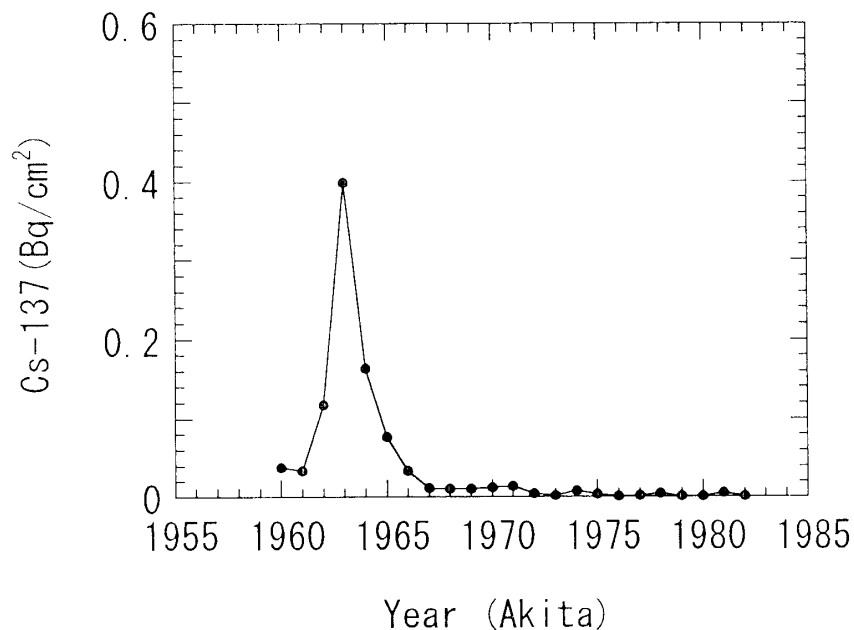


Fig. 4. Changes in Cs-137 concentration in Akita, Japan (Katsuragi, 1983; Katsuragi and Aoyama, 1986).

以上述べたように、豪雨等の土砂移動をもたらす地表部の環境変動は物理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。半減期が22.1年である $\text{Pb-210}_{\text{exc}}$ 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。Fig. 5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、 $\text{Pb-210}_{\text{exc}}$ の一定の減衰における変化として現われている（Taishi et al., 1991）。サンプル採取年と半減期から推定される年代および $\text{Pb-210}_{\text{exc}}$ 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。Fig. 6は余呉湖のコア試料における $\text{Pb-210}_{\text{exc}}$ の鉛直変動であるが、1959年のダム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。

3. 土壌侵食と環境同位体

土壌侵食の観測において Cs-137 の有効性が指摘されてから（Rogowski and Tamura, 1965; 1970）、とりわけ農耕地や牧草地におけるの土壌の侵食速度の推定や土壌流亡式の評価に関する Cs-137 法を用いた多くの研究が行われてきた（例えば、Quine et al., 1997; Montgomery et al., 1997）。これは Cs-137 が粘土成分に優先的に固着するという性質を利

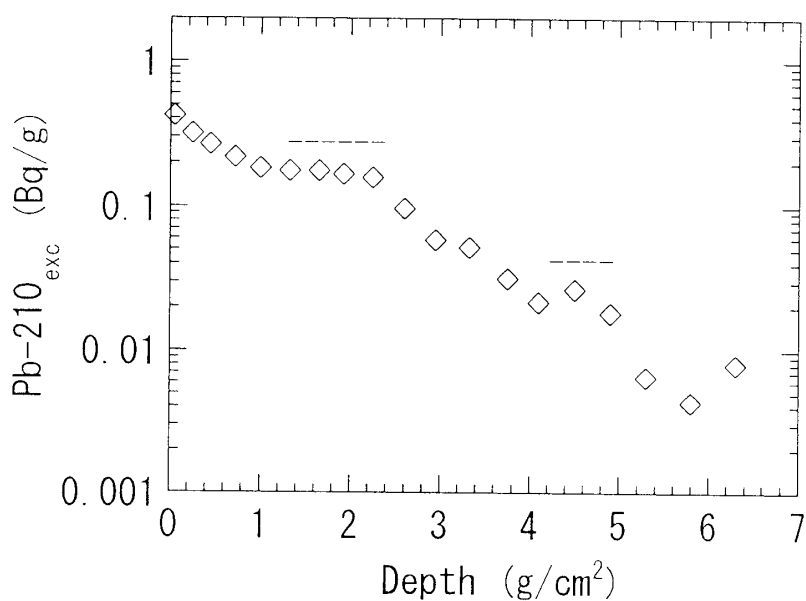


Fig. 5. Change in $\text{Pb-210}_{\text{exc}}$ concentration of Lake Biwa sediments (dotted bars indicate Meiji extreme heavy rainfall in 1896 and Isewan typhoon in 1959 respectively, modified after Taishi et al.(1991)).

用したものであるが、いくつかの問題点も指摘されている。例えば、Cs-137が固着していない部分がかかなりあるリル侵食やガリ侵食の適切な評価に関する疑問、あるいは表層土への固着が迅速でありかつ半永久的であるという仮定の妥当性に関する疑問が十分には解決されていない (Fredericks et al., 1988; Fredericks and Perrence, 1988)。しかしながら、過去数十年の地表部の変化を測定する場合には、現在も利用されている侵食ピン等に比べれば、Cs-137法は調査対象地に、いわば既に測器が設置されている状態に対応することを意味しており、遥かに多様な調査を可能にしてくれる。

ここではその一例として、金沢郊外にある池沼の集水域における Cs-137 法の適用例について報告しよう。対象地の植生は草地が少なく主に林地が占める集水面積が約 650 ha の流域である。Fig. 7はその尾根部、谷部、斜面部で 31 地点で円筒型のパイプで採取した土壌のうち表層部から 5 cm までの Cs-137 濃度を測定した結果と採取地点の侵食力（その地点の勾配と集水面積の積）の関係を調べたものである。尾根部では侵食力が小さく、谷部では大きい。そして斜面部ではその中間の値を取るという明らかな相違が認められる。また侵食力が大きい地点ほど Cs-137 濃度が減少するという明瞭な傾向を示している。つまり侵食力の大きな地点では Cs-137 濃度が高い表層土が侵食されやすいことを表しており、侵食の容易さを示すトレーサとして Cs-137 が有効であることを示している。

4. ま と め

以上のように湖沼一流域系における物質移動現象のいくつかとそれを測定する手法につ

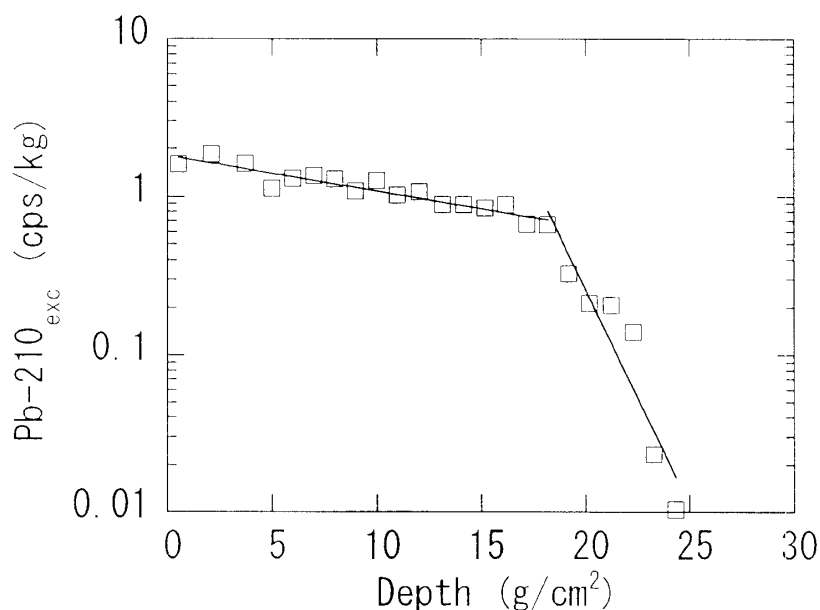


Fig. 6. Change in Pb-210_{exc} concentration of Lake Yogo sediments (bending in the regression line corresponds to the year of dam construction in the river Yogo flowing into the lake).

いて述べてきたが、今後の研究の展開にはより広範な議論が必要である。即ち、地形の時間的・空間的に詳細な変動を追跡するためには環境同位体を始めとする各種のトレーサの有効利用、関連分野の知見の活用そして新たなトレーサあるいはモニタリング装置の積極的な開発が不可欠である。例えば、ここでは地形変化量の指標となるトレーサについて池沼堆積物の物理量や Pb-210、そして流域土壌中の Cs-137 濃度について取り上げたが、とりわけ物理量や Cs-137 は侵食・堆積における地形変化の定量的測定（空間計測）における有力な方法の一つとして多用されている。従って、その拡張や適用限界について議論するためには、メカニズムに関するより詳細な理論的・実験的検討が必要であろう。また、変化速度の基準となる時間計測において近過去を対象とした Cs-137 法や Pb-210 法の有効性は明らかである。しかしながら、他の年代測定法と同様に、精度や解像度を向上させるためにはチェリノブイリ起源の Cs-137 や Am-241 等、他の方法（例えば、Appleby et al., 1991; 1993）との相互比較も必要であるとともに堆積プロセスに起因する歪の修正に関する方法論の確立も不可欠である。

本論をまとめるにあたり、金沢大学理学部地球学教室水文地形環境グループの諸君のお世話になった。余呉湖については畠田敏行君、金沢周辺の池沼・流域については金丸達也君（現信越化学（株））、飯沢稔（現ジャステック（株））および根谷高志君（現北国地水

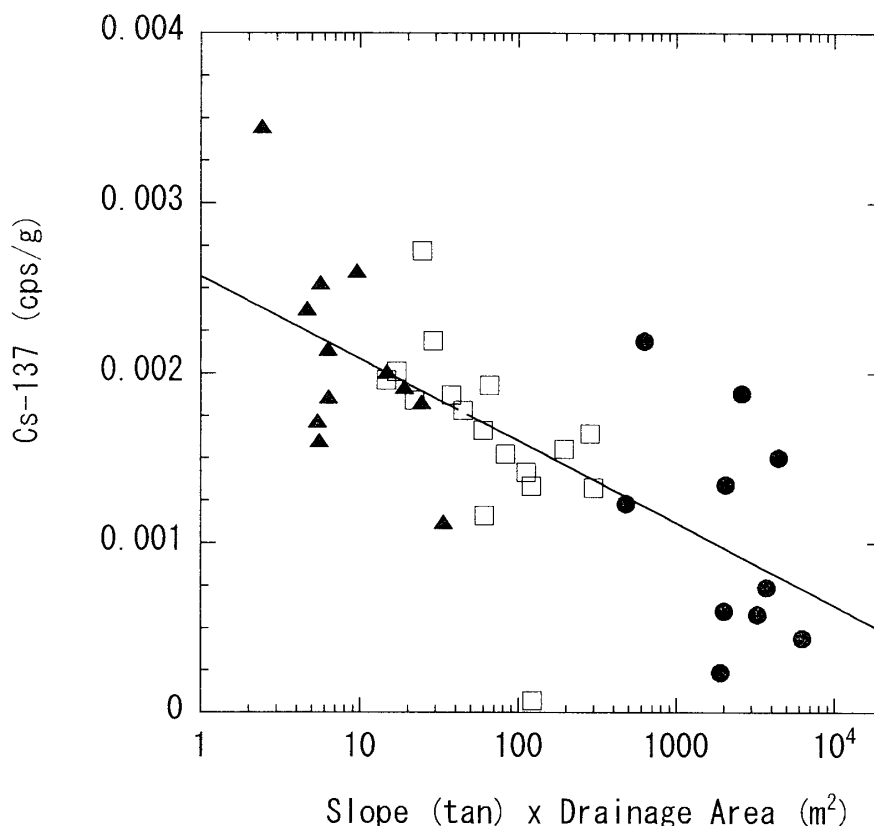


Fig. 7. Relationship between Cs-137 concentration and erosional index defined by product of tangent of slope and catchment area at sampling points. ▲: crest sites, □: slope sites, ●: valley sites.

(株)) がそれぞれ分析を行った。記して謝意を表したい。

引用文献

- Appleby, P. G., Richardson, N. and Nolan, P. J. (1991)²¹¹ Am dating of lake sediments, *Hydrobiologia*, **214**, 35-42.
- Appleby, P. G., Richardson, N. and Smith, J. T. (1993) 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. Limnol.*, **25**, 266-269.
- Davit C., Dearing, J. and Roberts, N. (1998) Land-use history and sediment flux in a lowland lake catchment: Groby Pool, Leicestershire, UK, *Holocene*, **8**, 383-394.
- de Roo, A. P. J. (1991) The use of ¹³⁷Cs as a tracer in an erosion study in south Limburg (The Netherlands) and the influence of chernobyl fallout: *Hydro. Processes*, **5**, 215-227.
- Foster, I. D. L., Dearing, J. A., Grew, R., and Orend, K. (1990) The lake sedimentary database: an appraisal of lake and reservoir-based studies of sediment yield, *IAHS pub.*, **189**, 19-43.
- Fredericks, D. J., Norris, V. and Perrence, S. J. (1988) Estimating erosion using caesium-137: 1. Measuring caesium-137 activity in a soil. In Bordas, M. P. and Walling, D. E. (Eds), *Sediment Budgets*, 174, 225-231. IAHS Pub. Wallingford, UK.
- Fredericks, D. J. and Perrence, S. J. (1988) Estimating erosion using caesium-137: 2. Estimating rates of soil loss. In Bordas, M. P. and Walling, D. E. (Eds), *Sediment Budgets*, 174, 233-240. IAHS Pub. Wallingford, UK.
- Harbor, J. (1999) (ed.) *Cosmogenic Isotope in Geomorphology*, *Geomorphology*: **27**, 1-172.
- 石川県 (1993) 石川県災異誌, 石川県, 277 p.
- 柏谷健二 (1996) 流域における地形環境の変動と湖沼の堆積過程: 地形, **17**, 1-12.
- 柏谷健二・太井子宏和・川谷 健・沖村 孝 (1988) 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, **9**, 193-200.
- Kashiwaya, K., Okimura, T., Kawatani, T., Aoki, T., and Isozumi, Y. (1995) Landslide environment and pond sediment information: In Slaymaker, O., ed., *Steepland Geomorphology*, Wiley and Sons, Chichester, p. 63-71.
- Kashiwaya, K., Okimura, T. and Harada, T. (1997) Land transformation and pond sediment information: *Earth Surface Processes and landforms*, **22**, 913-922.
- Katsuragi, Y. (1983) A study of ⁹⁰Sr Fallout in Japan: *Pap. Met. Geophy.*, **33**, 277-291.
- Katsuragi, Y. and Aoyama, M. (1986) Seasonal variation of Sr-90 fallout in Japan through the end of 1983: *Pap. Met. Geophy.*, **37**, 15-36.
- Montgomery, J. A., Busacca, A. J., Frazier, B. E. and McCool, D. K. (1997) Evaluating soil movement using Cesium-137 and the revised universal soil loss equation: *Soil. Sci. Soc. Am.*, **61**, 571-579.
- McManus, J. and Duck, R. W. (1993) *Geomorphology and sedimentology of lake and reservoirs*, Wiley, Chichester, 278 p.
- Quine, T. A., Govers, G., Walling, D. E., Zhang, X., Desmet, P. J. J. and Zhang, Y. (1997) Erosion processes and landform evolution on agricultural land-new perspectives from caesium-137 data and topographic-based erosion modelling: *Earth Surface Processes and landforms*, **22**, 799-816.
- Rogowski, A. S. and Tamura, T. (1965) Movement of ¹³⁷Cs by runoff, erosion and infiltration on the alluvial captina silt loam: *Health Physics*, **11**, 1333-1340.
- Rogowski, A. S. and Tamura, T. (1970) Erosional behavior of Cesium-137: *Health Physics*, **18**, 467-477.
- Scheidegger, R. E. (1960, 1970, 1991) *Theoretical Geomorphology*, Springer-Verlag, Berlin, 434 p.
- 太井子宏和・柏谷健二 (1993) 琵琶湖湖底堆積物の堆積異常: 地球, No. 8, 123-127.
- Taishi, H., Okuda, S., Shiki, T. and Kashiwaya, K. (1991) A Sedimentary Anomaly and the Related Sedimentation Process in Lake Biwa, Japan: *Zeit. Geomorph.*, **83**, 241-249.