山地斜面におけるピット調査から推定された 琵琶湖北方，駄口断層の活動履歴

金田平太郎** 井上 勉** 金原正明***
竹村恵二****

Surface-faulting History of the Daguchi Fault, North of Lake Biwa, Southwest Japan, inferred from Pit Excavations on a Mountain Slope

Heitaro KANEDA **, Tsutomu INOUE **, Masaaki KANEHARA ***
and Keiji TAKEMURA ****

Abstract

Excavating a pit across a small up-hill facing fault scarp on a mountain slope could be a paleoseismological tool for intramontane active faults, which usually lack suitable sites for traditional trenching. We tested this method on the Daguchi fault, north of Lake Biwa, southwest Japan, a typical short strike-slip fault in a mountainous region. Our test excavation at the Kurokoyama site on the southern subsegment of the fault, together with a re-interpretation of our previous excavation at the Daguchi site on the northern subsegment, allow us to obtain some constraints on the surface-faulting history of the fault. The timing of the most recent event is estimated to be 450–1050 cal. y.B.P. (900–1500 A.D.), whereas that of the penultimate event is poorly constrained: 1500–7300 cal. y.B.P. or prior to 5000–7300 cal. y.B.P., depending on different interpretations of the infilled fissure exposed on the pit wall. For either interpretation, our result is consistent with estimates from a previous paleoseismic study by Sugiyama and Yoshioka (1999), but the presence of other stratigraphically unidentifiable events cannot be ruled out, given the lack of piecing layers across the main fault in our pits, as well as their trench. The principal reason for the poor age control is an unexpected lack of peaty sediments at the Kurokoyama site, which is probably related to a high sedimentation rate and an unusual sedimentation process due to rapid soil creep on the mountain slope. Although application of this method might be limited on a mountain slope with rapid soil creep, which is commonly implied by the downslope

* 東京大学地震研究所

** 京都大学大学院理学研究科地球物理学教室

*** 奈良教育大学教育学部

**** 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

+ 現所属：産業技術総合研究所活断層研究センター

* Earthquake Research Institute, University of Tokyo

** Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

*** Faculty of Education, Nara University of Education

**** Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

+ Present Affiliation: Active Fault Research Center, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

bending of tree trunks as it is at the Kurokoyama site, our test excavations suggest that pit excavation on a mountain slope basically works as a paleoseismological tool in mountainous regions.

Key words : paleoseismology, mountain slope, uphill-facing fault scarp, Daguchi fault

キーワード：古地震学，山地斜面，逆向き低断層崖，駄口断層

I. はじめに

従来，活断層の活動履歴を解明する目的においては，沖積面上や段丘面上におけるトレンチ調査が最も効果的な手法として用いられてきた。しかし，平均変位速度が小さく長さの短い横ずれ活断層については山地内を通過するものが多く，トレンチ調査法の適用が困難な場合が少なくない。筆者らは，こうした活断層の活動履歴を解明するための積極的な調査手法として，山地斜面上に残る逆向き低断層崖をまたいでピットを掘削する方法（山地斜面におけるピット調査）を提案し，琵琶湖北方を走る駄口断層北部においてその試行調査を実施した（金田ほか，2002）。この調査手法は，形態的にはトレンチ調査の小規模なものであるが，調査地点の選定方法が沖積面・段丘面上を対象とした従来の方法（例えば，渡辺・鈴木，1999）とは異なり，山地斜面上の逆向き低断層崖にトラップされる形で堆積した堆積物に着目して活断層の活動履歴の解明を目指すことがその特徴である。本研究の目的は，同様の調査を駄口断層においてさらに実施して，駄口断層の活動履歴をより詳細に明らかにするとともに，本手法そのものの有効性・問題点についての考察を深めることである。

金田ほか（2002）の実施したピット調査（以下，「駄口サイト」と呼ぶ）の壁面については，その後，別の解釈の可能性が指摘され（杉山雄一，私信：地震調査研究推進本部地震調査委員会，2003），検討の結果，筆者ら自身も再解釈が必要であると考えたため，本論では，まず，駄口サイトにおけるピット調査の再解釈（解釈の修正）を行う。次に，今回新たに駄口断層中央部付近において実施

したピット調査（以下，「黒河山サイト」と呼ぶ）の結果を報告し，駄口サイトの再解釈とあわせて，駄口断層の活動履歴について考察を行う。さらに，最後に，両サイトでの調査結果に基づき，山地斜面におけるピット調査の有効性・問題点について考察を行う。なお，山地斜面におけるピット調査の詳細については，金田ほか（2002）を参照されたい。

II. 駄口断層についての概説

琵琶湖と若狭湾に挟まれた地域は標高 1000 m 以下の山地となっており，野坂山地あるいは湖北山地と呼ばれる。この地域は，近畿トラリアングル（Huzita, 1962）の北の頂部にあたり，短い横ずれ活断層が複雑かつ密に分布する日本列島においても特異な地域である（図 1）。駄口断層は，そうした横ずれ活断層のひとつで，長さ約 10 km の右横ずれ活断層とされるが（東郷，1974；活断層研究会，1991；岡田・東郷，2000；中田・今泉，2002），細かく見ると，駄口断層中央部には活断層地形が認められない区間が約 2 km 存在し，このギャップを挟んで両側では断層の走向がやや異なる（図 1；中田・今泉，2002）。そこで，本論では便宜上，このギャップから北側を北部セグメント，南側を南部セグメントと呼ぶこととする。駄口断層に沿っては，尾根・谷の系統的屈曲，段丘面の切断などの変位地形が存在するほか，特徴的な地形として，高さ 1 ～ 2 m 程度の逆向き低断層崖が山地斜面上に断続的に残存することが知られている（杉山・吉岡，1999；金田ほか，2002）。駄口断層の横ずれ平均変位速度については明らかになっていないが，変位地形の定性的観察から活動度は B 級（0.1 ～ 1.0 mm/yr）に相当

図 1 琵琶湖北方・野坂山地周辺の地形陰影図。

活断層分布は中田・今泉（2002）に基づく。

Fig. 1 Shaded 50 m DEM in and around the Nosaka Mountains, north of Lake Biwa, southwest Japan.

Active fault traces are based on Nakata and Imaizumi (2002).

するものと考えられている（活断層研究会, 1991; 岡田・東郷, 2000）。一方, 上下方向の平均変位速度については, 段丘面の上下変位から, 南部セグメントで約 0.15 mm/yr の値が得られている（杉山・吉岡, 1999）。

杉山・吉岡（1999）は, 同断層南部セグメントにおいてトレンチ調査および3ヶ所の補助的ピット調査を実施し, 最新活動時期を15～17世紀, 活動間隔を6000～7000年と推定した。一方, 既述の通り, 金田ほか（2002）は同断層北部セグメントの駄口サイトにおいて山地斜面におけるピット調査の試行調査を実施し, 最新活動時期を約1500年前（5～7世紀）と推定している。地震調査研究推進本部地震調査委員会（2003）は, 金田ほか（2002）のピット壁面の解釈に疑問があるとし, 杉山・吉岡（1999）の調査結果から, 最新活動時期を15～17世紀, 平均活動間隔を

7000年程度と評価した。また, これらの数字に基づき, 今後30年以内の地震発生確率をほぼ0%と発表している。

III. 駄口サイトにおけるピット調査の再解釈

駄口断層の北端近くに位置する駄口サイトにおけるピット調査は, 山地斜面を約1m上下方向に変位させる逆向き低断層崖をまたいで実施された（金田ほか, 2002: 図1）。図2に駄口サイトにおけるピット調査の壁面スケッチを再掲する。金田ほか（2002）は, 低断層崖にトラップされる形で堆積した堆積物（Ⅲ～Ⅶ層; 以下, トラップ堆積物と呼ぶ）について, 断層運動に伴う変位・変形構造が認められないとし, 最新活動時期をトラップ堆積物の堆積開始直前（約1500年前; 5～7世紀頃）と推定した。しかし, 泥炭質堆積物であるV-a層とその右側の破碎花崗岩との

図 2 駄口サイトにおけるピット壁面（南側壁面）のスケッチと年代測定値。
金田ほか（2002）の図 5 を一部改変して再掲。太線で囲まれた年代値は、エイジオフセットを無視しうると考えられるスギ・ヒノキの樹幹最外部（樹皮のすぐ内側）の年代値であり、信頼性の高い値である。一方、括弧内の年代値は、カビに侵されていた部位・樹種不明の試料の値であり、年代値の信頼性は著しく落ちると考えられる。

Fig. 2 Log of the southern wall of the Daguchi pit with radiocarbon ages.
Modified after Kaneda *et al.* (2002). Ages enclosed in rectangles are those of the outermost sapwoods (just inside bark), which are reliable and free from age offset. Age in parentheses is that of a moldy detrital wood of an unknown position within a tree, which is much less reliable.

間のシャープな境界は、V-a 層堆積中あるいはそれ以降に断層運動がなければ生じ得ないのではないかと、この指摘を論文公表後に受けた（杉山雄一、私信）。すなわち、V-a 層が単純に既存の崖を埋めながら堆積したのであれば、崖の表面はある時期、地表にさらされていたことになり、現在のⅡ層のような地表面からの土壌化を多少なりとも受けるはずである。しかし、調査時の記載・スケッチ・写真いずれに基づいても、V-a 層と破碎花崗岩の境界は、少なくとも V-a 層中下部までは極めてシャープであり、このような境界を生じ得るには、指摘の通り、V-a 層堆積中あるいはそれ以降の断層運動を想定する必要がある。V-a 層中下部～Ⅶ層内部に明瞭な変位・変形構造が認められ

ない点については、これらの地層が成層構造に乏しい泥炭質堆積物あるいは礫層で、変位・変形の検出が困難であることを考慮すると、十分説明可能であると考えられる。

以上から、本論では、金田ほか（2002）の解釈を修正し、トラップ堆積物開始以降に最新活動があったと再解釈する。そのイベントの時期は、断層の上方延長を明瞭に削り込んで覆っているⅣ層（細～中粒砂層）堆積以前で、V-a 層中下部堆積以降である。Ⅳ層から得られた炭化木片試料 S-2 の ^{14}C 年代値は $605 \pm 50 \text{ y.B.P.}$ ($\pm 2 \sigma$ の暦年補正值で西暦 1294 ～ 1414 年)、V-a 層下部から得られた樹幹最外部木片試料 S-3 の ^{14}C 年代値は $1015 \pm 50 \text{ y.B.P.}$ (同、西暦 898 ～ 1158 年)

であるが、このうち S-2 については樹種・部位が不明であるため、その年代値は年輪によるエイジオフセット（金田ほか, 2002）を含む可能性がある。年輪によるエイジオフセットは、年代測定誤差の中に入る可能性も高いと思われるが、本論では、最大 100 年程度のエイジオフセットを考慮し、最新イベント時期を西暦 900 ～ 1500 年と推定する。

一方、この場合、金田ほか（2002）がイベントを認めたトラップ堆積物基底については、イベント層準とは認定できない。上記のトラップ堆積物開始以降のイベントを認めた場合、すなわち、低断層崖が複数回のイベントによって形成されている場合には、最新活動以前にも現在のような閉塞環境が継続していたとは限らず、断層の横ずれ運動の影響によって、過去に堆積物の堆積しない環境下や侵食の進行するような環境下に位置した可能性も考えられるからである。したがって、現存するトラップ堆積物の基底年代（約 1500 年前）は、低断層崖の形成年代の上限値（最も若い年代）を与えるに過ぎず、最新活動に先行する古地震イベントの時期は、本ピット調査からは、約 1500 年前以前としか拘束されない。

以上をまとめると、駄口サイトにおいては、最新活動が西暦 900 ～ 1500 年（450 ～ 1050 年前）、それに先行する古地震イベントが約 1500 年前以前にあったと推定される。

IV. 黒河山サイトにおけるピット調査

1) ピット掘削地点

杉山・吉岡（1999）は、駄口断層南部セグメントにおいてトレンチ調査を行った際、その補助的な調査として、山地斜面に残存する逆向き低断層崖をまたいで、2箇所^{（くろこ）}の浅いピット掘削を実施した（図3の Pit No.1 および No.3, Pit No.2 は谷壁の露頭を整形したもの）。これら2箇所のピット調査では、堆積物を切る断層の存在を確認したものの、掘削深度はトラップ堆積物の基底まで達しておらず、活動履歴に関するデータもほとんど得られていなかった。そこで、今回、このうち Pit No.1 地点（黒河山サイト）において、よ

り深い再掘削調査を実施した。

黒河山サイトは、駄口断層南部セグメントの山地斜面に断続的に残存する逆向き低断層崖の北東端近くに位置する（図3）。この付近では、低断層崖によって山地斜面が上下方向におよそ3～4 m 食い違っており、尾根のクレストは、小鞍部を境に数 m 右横ずれしているように見える（図4）。この低崖については、推定される駄口断層のトレースに沿う形で尾根・谷を越えて直線的・断続的に数 100 m にわたり連続すること、複数のトレンチ・ピット調査で斜面とは逆方向に傾斜する断層の露頭が確認されていること（杉山・吉岡, 1999）、並走する同様の崖やクラックが全く認められないことなどから、重力性の山向き小崖（例えば、清水ほか, 1980）ではなく、テクトニックな要因による逆向き低断層崖であると考えられる。

ピット掘削を行った場所は低断層崖に沿って部分的に小凹地が形成されている部分である（図4）。ピットサイトから上流の集水域の大きさは見渡せる程度（数 1000 m² 程度）であり、木片が腐食を免れて長期間保存されうるような場所は存在しないことから、¹⁴C 年代値についての堆積によるエイジオフセットは年代測定の誤差範囲内に十分おさまると考えられる。なお、調査地周辺の現在の植生は、30 年生程度のスギの植林であるが、積雪による倒木のため、かなり広葉樹が混在している。

2) ピット壁面の記載

掘削は、2002 年 9 月、手掘りにより実施した。掘削したピットの大きさは、幅約 1.5 m、長さ約 4 m、深さ約 3.5 m である。ピット掘削には、男性 3 人の作業で約 3 日間を要した。また、深さが人の背丈を大きく超えるため、壁面の崩壊を防ぐための水圧式ジャッキ（shore）を設置した。図5にピット両壁面のスケッチを示す。

ピット底部に露出した花崗岩中には、断層ガウジを挟む明瞭な断層（N45° E, 70° E）が確認された。断層を挟んで隆起側の花崗岩は著しく破碎・白色粘土化しているのに対し、低下側の花崗岩はほとんど破碎を受けていない。低下側の花崗

図 3 駄口断層南部セグメント北部の断層変位地形。
杉山・吉岡（1999）によるトレンチ・ビット地点も示した。等高線は国土地理院 1：25000
地形図に基づく。等高線間隔は 10 m。

Fig. 3 Surface geomorphic expressions along the northern part of the southern subsegment of the
Daguchi fault.

Previous excavation sites by Sugiyama and Yoshioka (1999) are also shown. Contours are based
on 1: 25000 topographic map of the Geographical Survey Institute, Japan. Contour interval is 10 m.

岩の上位には層厚約 3.5 m にも及ぶ堆積物が確認されたが、予想に反して、泥炭質堆積物は表層部に認められたのみであり、その大部分は礫を含む弱腐植質土壌であった。これらの堆積物は、その層相から以下のように計 6 層に大きく区分される。

I 層は現在の地表に発達する褐色森林土であり、落葉や枝・小木片などを大量に含む。II 層は黒色の泥炭質堆積物であり、炭化した小木片を含む。湿地に準じた環境下でゆっくりと堆積したものと考えられる。この地層の下面からは根が下位の III・IV 層に多数侵入した痕跡が認められる。III 層は灰白色を呈する淘汰の良いシルト層で、わずかに細～中礫を含む。このシルト層の主たる起源は、白色の破碎花崗岩であると考えられる。お

そらく、低断層崖沿いに一時的に存在した水流による堆積物、もしくは小さな池の堆積物と推定される。IV 層は、層厚 2 m に及ぶ灰褐色～黄褐色の弱腐植質土壌層（褐色森林土 B～C 層相当）で、細～中礫サイズの角礫を含む。2 m もの厚さの土壌化が現地表面から進んだとは考えにくく、また、層内の土壌化程度もほぼ均質であるので、すでに土壌化したものが調査地に供給され堆積したと考えるのが最も自然であろう。礫・基質ともに淘汰は悪く流水作用による堆積は考えにくいこと、周辺は急な山地斜面で樹木には著しい根曲がりが見られることから、上方の山地斜面で形成された褐色森林土 B～C 層が、土壌クリープによって調査地に運ばれ、堆積したものと推定される。褐色森林土 B～C 層の上位に存在した

図 4 黒河山サイト周辺の詳細地形図。
等高線はトータルステーションを用いた測量に基づく。等高線間隔は 20 cm。矢印で示された閉曲線は凹地を示す。挿入図には、X-X' の断面図を示した。

Fig. 4 Precise topographic map around the Daguchi site based on total station survey. Contour interval is 20 cm. Closed contour indicated by an arrow is a local depression. X-X' profile is shown in the inset.

と考えられる黒色の A 層が埋没土壌として壁面に認められない理由は定かではないが、土壌クリープによる特殊な堆積過程が関係している可能性がある。すなわち、土壌がクリープによって調査地に堆積し続けている場合、単純に既存の堆積物を次々と覆う形で堆積が進行するとは考えにくく、地表面近くの既存の地層を巻き込む形の複雑な堆積過程により、A 層は埋没することなく、常に地表付近に堆積している可能性が考えられる。V 層は、細～中礫を主体とする角礫層で、やや土壌化した砂質のマトリックスをもつ。IV 層同様、礫・基質の淘汰は悪く、流水による堆積物とは考えにくい。上部斜面の崩壊に伴う崖錐性の堆積物、または土壌クリープを介したその二次堆積物

と推定される。最下位に位置する VI 層は、灰褐色を呈する砂～細礫質の弱腐植質土壌層（褐色森林土 B～C 層相当）で、中～大礫を含む。層相は IV 層とよく似ており、土壌クリープによって堆積したものと考えられる。

なお、図 5 のスケッチには表現されていないが、IV～VI 層にかけては、垂直に近い方向に延びる幅数 cm～20 cm 程度の、周囲と比べるとやや黒味がかった帯状の構造が多数認められる。この帯状構造については、枝分かれが認められること、壁面と垂直な方向には（すなわち、板状には）連続しないことから、後生的な樹根の侵入跡であると推定される。

図 5 黒河山サイトにおけるピット壁面のスケッチと年代測定値。
南西側壁面の垂直に並んだ黒点はテフラ分析のための堆積物の連続柱状サンプリング位置を示す。また、
番号のついた黒丸は花粉分析を実施した試料の採取位置を示す。

Fig. 5 Log of the walls of the Kurokoyama pit with radiocarbon ages.
Vertically aligned dots on the southwestern wall indicate the locations of continuous columnar sediment sampling for tephra analysis. Numbered solid circles show the sediment sampling locations for pollen analysis.

3) 断層構造とピット壁面の解釈

ピット底部に現れた花崗岩中の断層は、花崗岩 / トラップ堆積物の間のシャープな境界を限りながら上方へ続き、ピット底面から 1 m 強の位置で 2 条に分岐する。堆積物側（南東側）の断層は、トラップ堆積物と破碎花崗岩の間を限っているが、その境界は上記の樹根の侵入によって不明瞭化している場所が多い。部分的にはおそらく根の侵入によって削られるような形でとぎれており、ピット底面から 3.0 ~ 3.2 m の位置で堆積物に覆われて消滅する。一方、その数 ~ 10 数 cm 北西側の破碎花崗岩中にはシャープな断層が

並走する。堆積物側の断層が消滅する位置より上方では、花崗岩と堆積物との間の極めてシャープな境界を成し、ピット底面から 3.4 ~ 3.5 m の位置で不明瞭な境界へと急変する。また、これら 2 条の断層が分岐する位置では、花崗岩側の断層に沿って堆積物を取り込まれるような構造が認められた。

最新の古地震イベント層準は、駄口サイトの場合と同様の議論から、堆積物 / 破碎花崗岩のシャープな境界の上端に認定される。この上端位置を点で指し示すことはできないが、シャープな境界から不明瞭な境界への移行は 5 cm 以内の範

囲で完了し、急激である。ただし、地表面からの土壌化作用によって、当初はシャープであった境界が不明瞭化した可能性は否定できず、現在見えているシャープな境界の上端よりもさらに上位に、最新の古地震イベント層準がある可能性がある。このイベント層準とⅡ・Ⅲ層との関係は、本壁面では不明である。

また、崖錐性堆積物もしくはその二次堆積物と推定されるⅤ層は、断層と接する部分で明瞭な割れ目構造をつくっており、上位のⅣ層によって充填されているように見えるので、Ⅳ層とⅤ層の間にも、もう1つ別のイベントがあった可能性が考えられる。ただし、この構造が、最新イベントの際の横ずれ変位に伴って地下で形成された可能性もあり、古地震イベントとしての確実性は高いとは言えない。

一方、現存するトラップ堆積物の堆積開始時期は、駄口サイトと同様の議論から、低断層崖の形成年代の上限値（最も若い年代）を与えるに過ぎないと考えられる。

以上から、本ピット壁面では、トラップ堆積物の堆積開始以降に少なくとも1回の古地震イベントが確実に認定され、Ⅳ層の構造を考慮に入れると、不確実ながら、このイベント以前にも別のイベントが存在した可能性がある。また、それらに先行する古地震イベントがトラップ堆積物開始以前に推定される。

4) 年代論

本サイトにおいては、トラップ堆積物は土壤クリープによって堆積したと推定される弱腐植質土壌を主体とし、木片を含む泥炭質堆積物は上部わずか30 cmに認められたのみであった（Ⅱ層）。そのため、木片の ^{14}C 年代測定によって各地層の堆積年代および各古地震イベント年代を精度良く推定することはできない。本サイトで泥炭質堆積物が堆積していなかった原因については後で考察することとし、本項では、トラップ堆積物のおおよその堆積年代を明らかにすることを目的として実施した有機質堆積物の ^{14}C 年代測定、テフラ分析、花粉分析の結果について述べる。

Ⅱ層に含まれる炭化木片については、すでに杉

山・吉岡（1999）が年代測定を行っており、Ⅱ層中部から $190 \pm 40 \text{ y.B.P.}$ （ $\pm 2\sigma$ の暦年補正值で西暦1644年以降）、基底部から $330 \pm 40 \text{ y.B.P.}$ （同、西暦1472～1646年）の年代値を得ている（表1、図5）。したがって、Ⅱ層の堆積開始は、最も早くても1400年代半ば以降であると推定される。

ⅣおよびⅥ層からは、有機質堆積物（弱腐植質土壌）を6ヶ所で採取し、加速器質量分析（AMS）法による ^{14}C 年代測定を実施した（核燃料サイクル開発機構に依頼：表1、図5）。一般に、有機質堆積物中の炭素の供給源は複雑であり、その ^{14}C 年代値の解釈は容易ではないとされる（ボウマン，1998）。実際、今回得られた年代値も、Ⅳ層上部で $2390 \pm 60 \text{ y.B.P.}$ および $2790 \pm 60 \text{ y.B.P.}$ 、Ⅳ層基底で $3850 \pm 60 \text{ y.B.P.}$ および $4460 \pm 60 \text{ y.B.P.}$ 、Ⅵ層で $3800 \pm 60 \text{ y.B.P.}$ および $2740 \pm 60 \text{ y.B.P.}$ と大きくばらついており、最大1500年以上もの層序との逆転も認められる。集水域の極めて小さい本ピットサイトに限れば、非現地性の古い木片の混入によって年代値が実際の土壌化年代よりも大幅に古く求められる可能性は低いと考えられるが、山地斜面上での土壌化年代と、その土壌が土壤クリープによってピットサイトに堆積した年代の間には差がある。土壤クリープの速度は一般に数mm～数cm/yrとされるが（園田，2000；松林・田村，2000）、ピットサイト周辺の樹木（最大で30年生程度）の根曲がり量（数10 cm以上）から考えて、当地における土壤クリープ速度は数cm/yrもしくはそれ以上に達している可能性が高いものと考えられる。この場合でも、ピットサイトの集水域（斜面長、20～30 m程度）を完全に横断するには、数100年オーダーの時間がかかることになる。しかし、山地斜面を移動中にも土壌化作用は継続して進行しており、新しい炭素が土壌中に取り込まれ続けるので、土壌の ^{14}C 年代と堆積年代の差は、実際には、数100年よりずっと小さく、本論におけるおおよその年代の議論には影響を与えないものと考えられる。

一方、既述のように、Ⅳ～Ⅵ層は後生的な樹

表 1 黒河山サイトの年代測定値一覧。
杉山・吉岡(1999)によって測定された値も併せて示した。年代測定はすべて加速度質量分析(AMS)法による。

Table 1 Radiocarbon ages for the Kurokoyama pit.

Those dated by Sugiyama and Yoshioka (1999) are also shown. All samples are dated by accelerator mass spectrometry (AMS) method.

D	Unit	Material	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	^{14}C age [y.B.P.]	Calibrated age* (2 σ) [cal. y.B.P.] (Calendar year)	Lab. no.**
P1-E2 ***	II	coal	-26.3	190 $\pm$ 40	0 - 306 (1644 - 1950 AD)	Beta-123641
P1-E1 ***	II	coal	-26.4	330 $\pm$ 40	304 - 478 (1472 - 1646 AD)	Beta-123640
NE-2	IV (upper)	organic sediment	-26.53	2390 $\pm$ 60	2328 - 2712 (762 - 378 BC)	JNC-4650
SW-4	IV (upper)	organic sediment	-25.86	2790 $\pm$ 60	2774 - 3075 (1125 - 824 BC)	JNC-4649
NE-3	IV (base)	organic sediment	-25.51	3850 $\pm$ 60	4021 - 4420 (2470 - 2071 BC)	JNC-4652
SW-3	IV (base)	organic sediment	-24.93	4460 $\pm$ 60	4874 - 5296 (3346 - 2924 BC)	JNC-4651
NE-1	VI	organic sediment	-25.31	3800 $\pm$ 60	3987 - 4407 (2457 - 2037 BC)	JNC-4654
SW-5	VI	organic sediment	-26.83	2740 $\pm$ 60	2749 - 2988 (1038 - 799 BC)	JNC-4653

* calibrated by CALIB (Stuiver and Reimer, 1993) rev. 4.3.

** Beta, Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory; JNC, Japan Nuclear Cycle Development Institute.

*** after Sugiyama and Yoshioka (1999)

根の侵入を多数受けており、その影響で場所によっては年代値が大きく若返る可能性は十分にある。特に、微量の炭素について年代測定を行うAMS法を用いた場合には、こうした影響を受けやすいものと推定される。したがって、今回得られた年代値のばらつきや逆転の主要因は、後生的な樹根の侵入による若返りであると考えられ、得られた年代値は基本的には実際の土壌化年代の上限値(最も若い年代)を与えるものと解釈される。今回得られた年代値で最も古い値はIV層基底から得られた4460 $\pm$ 60 y.B.P. ($\pm 2\sigma$ の暦年補正值で4874 ~ 5296 cal. y.B.P.)であるので、トラップ堆積物の堆積開始は、少なくとも約5000年前以前に遡ることが推定される。

テフラ分析は、IV ~ VI層について堆積物を

10 cm ずつ柱状に連続採取し(図5)、Takemura and Danhara (1994)に準じた方法に従って実施した。しかし、火山ガラスの含有率はいずれの試料でも極めて低く(0 ~ 1.2%)、有意な濃集帯は認められなかった。確認された火山ガラスの大半は屈折率1.498 ~ 1.501を示すバブルウォール型ガラスであり、始良Tn(AT)テフラ(約2.6 ~ 2.9万年前; 町田・新井, 2003)起源である可能性が高い。しかし、後生的な根の侵入等によってごく微量の火山ガラスが地下に取り込まれる可能性もあることから、本テフラ分析結果に基づく年代の議論はできない。

花粉分析は、IV ~ VI層について約50 cm 間隔で7試料の堆積物を採取し(図5)、パリノ・サーヴェイ(株)に依頼した。図6にその分析結果

図 6 黒河山サイトの花粉分析結果。

分析はパリーノ・サーヴェイ (株) による。黒丸は 1 % 未満、+ は花粉の産出が少ない試料 (計 100 個体未満) における産出を示す。

Fig. 6 Compiled results of pollen analysis for the Kurokoyama pit.

The analysis was performed by Palynosurvey Co., Ltd. Solid circles indicate concentrations of less than 1%. Crosses indicate the presence of a specific pollen particle in a sample with insufficient pollen-particle counting (less than 100 particles).

を示す。土壌化作用のため花粉の保存状態は全体に悪く、7 試料のうち 3 試料については出現率の算出に耐えうる個体数 (100 個体) の同定に至らなかった。そうした試料も含め、各試料間で花粉組成に大きな相違は認められず、いずれもスギ属 (*Cryptomeria*), ブナ属 (*Fagus*), コナラ属 (*Quercus* subgen. *Lepidobalanus*), コナラ属アカガシ亜属 (*Quercus* subgen. *Cyclobalanopsis*) を主成分とする。野坂山地周辺における最終氷期以降の植生変遷は、山門湿原 (黒河山サイトから北東約 4 km: 高原, 1993), 池河内湿原 (同, 北東約 12 km: 高原ほか, 1995), および三方五湖低地 (同, 北西約 17 km: 安田, 1982; Takahara and Takeoka, 1992a, b) における花粉分析によってすでに明らかになっている。これらの結果との比較に基づくと、IV~VI 層の花

はモミ属 (*Abies*)・ツガ属 (*Tsuga*)・トウヒ属 (*Picea*) などを主成分とする最終氷期の花粉組成とは全く異なり、明らかに後氷期以降の花粉組成を示す。特に、コナラ属アカガシ亜属が目立って産出するようになるのは、いずれの先行研究においても鬼界アカホヤ (K-Ah) テフラ (約 7300 年前: 町田・新井, 2003) 降下以降であるので、トラップ堆積物の堆積開始も約 7300 年前以降であったと推定される。しかし、それ以降の植生変化は、人間の森林伐採に伴ってマツ属 (*Pinus*) が激増するまでは小さく、マツ属激増の時期は野坂山地周辺においても場所によって 2000 ~ 150 年前と大きく異なるため、トラップ堆積物の堆積開始時期の上限値については言及できない。

以上の年代に関するデータをまとめると、トラップ堆積物の堆積開始時期は、有機質土壌の

^{14}C 年代測定結果から約5000年前以前、花粉分析結果から約7300年前以降であったと推定される。したがって、黒河山サイトにおけるピット調査からは、約5000～7300年前以降に少なくとも1回、不確実なものも含めれば2回の古地震イベントが推定され、それらのイベントに先行するイベントが約5000～7300年前以前に推定される。

V. 考 察

1) 最新活動時期

駄口断層の最新活動時期は、駄口サイトでは西暦900～1500年(450～1050年前)と推定された。一方、黒河山サイトでは、約5000～7300年前以降に少なくとも1回、不確実なものも含めると2回の古地震イベントが推定されたのみで、詳細な活動時期には言及できなかったが、駄口サイトにおける結果と矛盾はしていない。

駄口サイトで求められた最新活動時期(西暦900～1500年)は、杉山・吉岡(1999)が南部セグメントのPit No.2で求めた15～17世紀(西暦1401～1700年)と重なり、両者に基づく西暦1401～1500年という狭い範囲でその時期が拘束される。しかし、杉山・吉岡(1999)は有機質堆積物(土壌)の ^{14}C 年代を基に最新活動時期を推定しており、年代値の信頼性についてはやや疑問が残る。測定された年代値に最大200年近い層序との逆転が認められることから、15～17世紀という最新活動時期に100年の精度があるとは思えない。特に、Pit No.2は表土に覆われていた谷壁斜面を浅く掘削・整形したものであるため、掘削前の地表面からの土壌化作用により年代値が若返っている可能性は十分にある。したがって、本論では、駄口断層の最新活動時期として、駄口サイトで求めた西暦900～1500年をより妥当な推定と考える。

杉山・吉岡(1999)は、駄口断層が1662年寛文地震時に三方断層・野坂断層など他の断層と同時に活動した可能性を指摘したが、上記の推定に基づけば、その可能性は低い。一方、敦賀断層・柳ヶ瀬断層が同時に活動した可能性が指摘されて

いる1325年正中地震(杉山ほか, 1998)については、上記の推定時期内に入るが、16世紀以前における歴史資料の欠落の可能性を考慮すると、駄口断層の活動に対応する未知の地震が存在した可能性も考えられる。実際に複数の活断層が同時に活動したかどうかの判断は現在の年代決定の精度を大きく超えるが、いずれにせよ、中世から近世初頭にかけての時期に、野坂山地周辺に複雑に分布する活断層の大部分が活動したことはほぼ間違いないと考えられる。

2) 最新活動に先行する活動と活動間隔

最新活動に先行する古地震イベントの時期については、駄口サイトでは約1500年前以前と推定された。一方、黒河山サイトでは、壁面の解釈によって2通りの推定が得られる。すなわち、IV層とV層の間にイベントを認めた場合には、約5000～7300年前以降最新イベント以前、認めない場合には、約5000～7300年前以前となる。したがって、駄口・黒河山両サイトの結果を合わせると、最新活動に先行するイベントの時期は、前者の場合、1500～7300年前、後者の場合、約5000～7300年前以前と推定される。杉山・吉岡(1999)は、南部セグメントで実施したトレンチ調査から、5000～8000年前に最新活動に先行するイベントが発生した可能性を指摘したが、上記いずれの解釈もこの推定と矛盾せず、解釈の妥当性についての判断はできない。

杉山・吉岡(1999)の推定を用いると、最新活動と先行するイベントの間隔は、4000～7500年となる。ただし、ここで注意すべきことは、杉山・吉岡(1999)のトレンチ調査も、本論で述べた2箇所のピット調査も、主断層を挟んで両側に対応する地層が存在せず、壁面上で認定できないイベントが存在した可能性を必ずしも否定できないことである。したがって、イベントの間隔は4000～7500年より短くなる可能性も捨てられない。

なお、杉山・吉岡(1999)は、山地斜面に残存する逆向き低断層崖が最新活動1回分の変位を記録していると判断し、その一般的な比高約1m(山地斜面の上下変位ではなく、崖そのものの高

さと考えられる)を上下平均変位速度 0.15 mm/yr で除することによって、駄口断層の活動間隔を $6000 \sim 7000$ 年と推定している。しかし、本論のピット調査からも明らかなように、低断層崖の中には複数回のイベントによって形成されているものも多いと考えられる上、真の上下変位量を見積もるためには、横ずれに伴う見かけの上下変位成分や低断層崖頂部(クレスト)の侵食量、低断層崖背後の凹地の侵食・埋積量も考慮する必要がある。したがって、山地斜面上で最新活動による平均的な上下変位量を見積もることは、実際には容易ではないと考えられる。低断層崖の比高と上下平均変位速度から得られた $6000 \sim 7000$ 年という活動間隔の妥当性については再検討の余地が残っているであろう。

3) 山地斜面におけるピット調査の有効性と問題点

駄口・黒河山両サイト周辺の地形環境は酷似しており(金田ほか, 2002の図4および本論の図4)、現在の植生環境にも大きな相違は認められない。それにも関わらず、黒河山サイトでは、泥炭質堆積物がほとんどトラップされておらず、駄口サイトのような精度の高い年代の議論はできなかった。本項では、その原因を中心として、山地斜面におけるピット調査の有効性と問題点について考察を行う。

駄口サイトの標高は約 220 m 、黒河山サイトの標高は約 670 m で差はないようにも思える。しかし、分水嶺(この付近では標高 750 m 程度)に近い黒河山サイト周辺は多雪地帯で、付近にはスキー場(国境スキー場)も存在するのに対し、駄口サイト付近は近年では根雪になることさえない。そして、これに対応するように、黒河山サイト付近でのみ、著しい樹木の根曲がりが見られる。したがって、黒河山サイトで泥炭質堆積物がトラップされていなかった主要因としては、まず、積雪のグライドに伴う激しい土壌クリープが考えられる。すなわち、断層運動によって形成された凹地が、激しい土壌クリープによってすぐに埋められてしまうため、閉塞化した環境が形成されず、泥炭質堆積物が堆積し得なかった可能性が

ある。実際、駄口サイトでは凹地の半分程度がトラップ堆積物によって埋積されているのに対し(図2)、黒河山サイトでは凹地のほぼ9割がトラップ堆積物によって埋積されている(図5)。

また、地表付近に泥炭質堆積物や集積したA層が存在していたとしても、断層走向方向の一時的な水流によって削られたり、凹地が堆積物であふれることによって、表層部がさらに下部斜面へとクリープしていったりする可能性も考えられる。いずれにしても、樹木の根曲がりが多く認められるなど、速い土壌クリープが示唆されるような山地斜面では、逆向き低断層崖が存在しても泥炭質堆積物がほとんどトラップされていない可能性があり、今後の調査では注意が必要である。

今回の調査で明らかになったもう一つの重要な点は、ピット掘削を行った2つのサイトでは、いずれも、堆積物をトラップした低断層崖が複数回の古地震イベントの累積結果であったという点である。これまで、山地斜面上に残存する逆向き低断層崖は、最新活動1回分の変位を記録していると考えられることが多かったが(岡田・松田, 1992; 岡田ほか, 1992; 杉山ほか, 1998; 杉山・吉岡, 1999; 荏谷, 1999)、実際には、複数回の地震変位が累積した断層崖(composite fault scarp)も少なくないと推定される。したがって、こうした低断層崖をまたいでピットを掘削することにより、最新活動時期のみならず、最新活動に先行するイベントの時期についても、情報が得られる可能性がある。ただし、断層の両側を挟んで対応する地層が存在しないため、壁面上で検知できない古地震イベントが存在する可能性があるという問題点も併せもつため、より確実度の高い活動履歴の解明のためには、多数のピット掘削を行った上で、トレンチ調査結果や変動地形的観察(平均変位速度や単位変位量など)も併せて総合的に判断する必要があるだろう。

以上のように、山地斜面におけるピット調査は様々な制約や問題点を伴うが、現在のところ、従来のトレンチ調査が適用できないような山地内を走る活断層(あるいはその一部区間)における唯一の積極的古地震調査手法であり、今後のさらな

る適用が望まれる。その際の最初の問題は、逆向き低断層崖を見つけることであるが、この点に関しては、近年、地形学的研究において使用されはじめた航空レーザー測量 (LIDAR: Light Detection and Ranging) が注目される。実際、アメリカ合衆国北西岸地域では、LIDAR を用いることによって、植生下に隠された低断層崖が多数発見され、その低断層崖をまたいだトレンチ調査によるめざましい古地震学的成果が報告されている (例えば, Nelson *et al.*, 2003; Johnson *et al.*, 2004)。植生に覆われた日本の山地斜面上においても、同様に、LIDAR の適用によって多数の逆向き低断層崖が発見される可能性がある。その場合でも、依然、重力性の山向き小屋 (例えば、清水ほか, 1980) や猪垣などの人工地形 (金田, 2004) との誤認に留意する必要があるが、LIDAR によって低崖の詳細な平面形態・分布が判明していれば、こうした紛らわしい地形との区別も容易になろう。LIDAR とピット調査を組み合わせた古地震調査の適用・発展が期待される。

VI. ま と め

本論では、駄口断層南部セグメントの黒河山サイトにおいて山地斜面におけるピット調査を実施し、金田ほか (2002) の行った駄口サイトにおけるピット調査結果の再解釈 (解釈の修正) と併せて、駄口断層の活動履歴について検討を行った。その結果、最新活動時期は西暦 900 ~ 1500 年 (450 ~ 1050 年前)、最新活動に先行する活動は、1500 ~ 7300 年前 (黒河山サイトの IV 層と V 層の間のイベントを認めた場合)、もしくは、約 5000 ~ 7300 年前以前 (同イベントを認めない場合) と推定された。ただし、本調査手法では、主断層を挟んで両側に対応する地層が存在しないため、上記イベント以外に、壁面上で認定できない古地震イベントが存在した可能性も否定できない。

また、これらの調査結果から、山地斜面におけるピット調査の有効性と問題点について考察を行った。黒河山サイトでは、予想に反して、泥炭質堆積物がほとんどトラップされておらず、駄口

サイトのような精度の高い年代の議論はできなかったが、その原因としては、冬季の積雪に起因する激しい土壌クリープやその特殊な堆積過程が考えられる。樹木の根曲がりが多く認められるなど、速い土壌クリープが示唆されるような山地斜面では、本調査法の有効性が限られる可能性があり、今後のサイト選定では、こうした点にも留意する必要がある。

謝 辞

産業技術総合研究所関西センターには、温度変化型屈折率測定装置 (RIMS 86) の使用を許可していただきました。同研究所活断層研究センターの杉山雄一センター長には、現地で議論をしていただいた上、粗稿に対して有益なコメントをいただきました。同研究所地質情報研究部門の小松原 琢博士、京都大学の岡田 篤正教授、堤 浩之助教授には、現地での議論も含め、有益な議論をしていただきました。京都府立大学の高原 光教授およびニューキャッスル大学の中川 毅講師には、花粉分析結果の解釈について助言をいただきました。東京大学地震研究所の島崎邦彦教授には、粗稿に対して有益なコメントをいただきました。京都大学大学院生 (当時を含む) の中西利典、杉戸信彦、土志田正二、松岡 暁、今村朋裕の各氏には、黒河山サイトのピット調査を手伝っていただきました。また、2名の査読者による丁寧な査読により、本稿は大幅に改善されました。本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラム (2002-A-04) の援助を受けました。以上の方々・機関に感謝いたします。

文 献

- ボウマン, シェリダン著, 北川浩之訳 (1998): 年代測定. 学芸書林. Bowman (1990): *Radiocarbon Dating*. British Museum Press.
- Huzita, K. (1962): Tectonic development of the Median Zone (Setouchi) of southwest Japan, since the Miocene: With special reference to the characteristic structure of central Kinki area. *J. Geosci. Osaka City Univ.*, **6**, 103-144.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2003): 湖北山地断層帯の長期評価について. http://www.jisin.go.jp/main/chousa/03jun_kohoku/index.htm.
- Johnson, S.Y., Nelson, A.R., Personius S.F., Wells, R.E., Kelsey, H.M., Sherrod, B.L., Okumura, K., Koehler III, R., Witter, R.C., Bradley, L. and Harding, D.J. (2004): Evidence for late Holocene earthquakes on the Utsalady point fault, Northern Puget Lowland,

- Washington. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **94**, 2299-2316.
- 金田平太郎 (2004): 山地斜面における低断層崖と猪垣の認定区分について—根尾谷断層における調査事例から—。活断層研究, **24**, 95-101.
- 金田平太郎・竹村恵二・金原正明 (2002): 山地斜面におけるピット調査—活断層の最新活動時期解明手法としての有効性と問題点: 駄口断層を例として—。地学雑誌, **111**, 747-758.
- 荻谷愛彦 (1999): 濃尾活断層系長滝断層の変位地形と最新活動。地質調査所速報, **EQ/99/3** (平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 131-140.
- 活断層研究会編 (1991): 新編日本の活断層—分布図と資料—。東京大学出版会。
- 町田 洋・新井房夫 (2003): 新編火山灰アトラス—日本列島とその周辺—。東京大学出版会。
- 松林 武・田村俊和 (2000): 斜面上の位置ごとのソイルクリップ速度—継続的野外観測の試み—。季刊地理学, **52**, 59-60.
- 中田 高・今泉俊文編 (2002): 活断層詳細デジタルマップ。東京大学出版会。
- Nelson, A.R., Johnson, S.Y., Kelsey, H.M., Wells, R.E., Sherrod, B.L., Pezzopane, S.K., Bradley, L., Koehler III, R.D. and Bucknam, R.C. (2003): Late Holocene earthquakes on the Toe Jam Hill fault, Seattle fault zone, Bainbridge Island, Washington. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **115**, 1388-1403.
- 岡田篤正・松田時彦 (1992): 根尾村水鳥および中付近における根尾谷断層の第四紀後期の活動性。地学雑誌, **101**, 19-37.
- 岡田篤正・東郷正美編 (2000): 近畿の活断層。東京大学出版会。
- 岡田篤正・渡辺満久・安藤雅孝・佃 為成・平野信一 (1992): 濃尾活断層系から発生した古地震の考察—梅原断層のトレンチ調査—。地学雑誌, **101**, 1-18.
- 清水文健・東郷正美・松田時彦 (1980): 日本アルプス・野口五郎岳付近における小崖地形の成因。地理学評論, **53**, 531-541.
- 園田美恵子 (2000): 森林斜面における表層土のクリープについての研究。京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻博士論文。
- Stuiver, M. and Reimer, P.J. (1993): Extended 14C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, **35**, 215-230.
- 杉山雄一・吉岡敏和 (1999): 敦賀断層系駄口断層の活動履歴調査。地質調査所速報, **EQ/99/3** (平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 173-186.
- 杉山雄一・吉岡敏和・寒川 旭・佐竹健治 (1998): 敦賀断層の活動履歴調査。地質調査所速報, **EQ/98/1** (平成9年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 101-112.
- 高原 光 (1993): 滋賀県山門湿地周辺における最終氷期以降の植生変遷。日本花粉学会会誌, **39**, 1-10.
- Takahara, H. and Takeoka, M. (1992a): Postglacial vegetation history around Torihama, Fukui Prefecture, Japan. *Ecol. Res.*, **7**, 79-85.
- Takahara, H. and Takeoka, M. (1992b): Vegetation history since the last glacial period in the Mikata lowland, the Sea of Japan, western Japan. *Ecol. Res.*, **7**, 371-386.
- 高原 光・西田史朗・竹村恵二 (1995): 福井県池河内湿地周辺における晩氷期以降の植生変遷。日本花粉学会会誌, **41**, 99-108.
- Takemura, K. and Danhara, T. (1994): A method for determination of volcanic glass concentrations in sedimentary sequences and its application to Quaternary studies. *Geoarchaeol. Int. J.*, **9**, 301-316.
- 東郷正美 (1974): 琵琶湖北岸・野坂山地の変動地形。地理学評論, **47**, 669-683.
- 渡辺満久・鈴木康弘 (1999): 活断層地形判読—空中写真による活断層の認定—。古今書院。
- 安田喜憲 (1982): 福井県三方湖の泥土の花粉分析的研究。第四紀研究, **21**, 255-271.

(2004年8月12日受付, 2005年7月26日受理)