蔚山断層系（韓国東南部）中央部の活断層地形と断層露頭

岡田 篤 正¹ 渡辺 満 久² 鈴木 康 弘³
慶 在 福⁴ 曹 華 龍⁵ 金 性 均⁶
尾池 和 夫¹ 中村 俊 夫⁷

Active Fault Topography and Fault Outcrops in the Central Part of the Ulsan Fault System, Southeast Korea

Atsumasa OKADA¹, Mitsuhsa WATANABE², Yasuhiro SUZUKI³,
Jai-Bok KYUNG⁴, Wha-Ryong JO⁵, Sung-Kyun KIM⁶,
Kazuo OIKE¹ and Toshio NAKAMURA⁷

Abstract

The Ulsan fault system situated in the southeastern part of Korean Peninsula marks the western range front of the Mt. Tohan (745.1m) to the Sandae Peak (629.1m) with the remarkable Ulsan fault scarp. This system extends with a N-S trend for a distance of more than 40 km. The NNE-SSW trending 200 km-long Yangsan fault and this Ulsan fault are recognized as the most important active faults on the Korean Peninsula.

From interpretations of aerial photographs and detailed topographic maps, and field surveys along the central part of the Ulsan fault system, the major results are summarized as follows:

1. The Ulsan fault system extends in the direction of NNW-SSW to N-S and the trace is slightly sinuous (Fig. 1). The middle to higher river terrace surfaces on this system are displaced up thrown to the east side (Fig. 2). The streams and the ridges across this fault trace are not accompanied by systematic lateral displacement. The Ulsan fault system is a typical example of reverse faulting, considered from the behavior of fault outcrops (Figs. 3, 4, 5).

2. The vertical displacements are about 5 m on the middle terrace, and about 15 m

¹ 京都大学大学院理学研究科地球物理学教室

² 東洋大学文学部教育学科地理学研究室

³ 愛知県立大学情報科学部地域情報学科

⁴ 韓国教員大学校地球科学科

⁵ 慶北大学校師範大学地理学科

⁶ 全南大学校自然科学大学地質学科

⁷ 名古屋大学年代測定試料研究センター

¹ Geophysical Institute, Graduate School of Science, Kyoto University

² Geographical Laboratory, Faculty of Literature, Toyo University

³ Department of Applied Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

⁴ Department of Earth Sciences, Korea University of Education

⁵ Department of Geography, Kyungpook University

⁶ Department of Geology, College of Natural Sciences, Chonnam National University

⁷ Dating Research Center, Nagoya University

on the higher terrace from measurements of topographical cross-section across the fault scarplets. The cumulative vertical displacement is recognized during and after the formation of the terraces. The sense of vertical displacement of fluvial terraces coincides with the magnificent fault scarp. This mode of mountain-building movement has continued repeatedly at least since the middle of Quaternary.

3. The terrace surfaces originated from the dissected fan surfaces in the late Quaternary. From geomorphic correlation, facies analysis, development of soil covering the terraces, and results of dating of humic material, etc., the ages of terrace surfaces are roughly estimated and the average slip rates of vertical displacement are measured to be about 0.1-0.08 mm/y.

4. Fault outcrops are clearly observed along the Ulsan fault in this area. The shattered granite rocks thrust over the gravel deposits composing the middle terrace at the north bank of Sagok Pond, Malbang-ri, Wedong-eop, Kyeongju-gun, Kyeongsang-bukdo (Fig. 3-A, B). The fault strikes in the direction of N-S and dips eastward at an angle of 20-30° E. The shattered granite is in contact with the slightly weathered and deformed gravel at the northeast of Kaegok-ri settlement (Fig. 5).

5. Liquefaction phenomena are observed within the upper horizon of the middle terrace deposits at the northwest of the Sagok Pond (Fig. 6).

6. As the NNW-SSE (or N-S) trending Ulsan fault system is predominantly a reverse fault and NNE-SSW trending Yangsan fault system has been dislocated with a predominant right-lateral slip in the late Quaternary, it is estimated that this area is situated under the maximum horizontal stress field in the ENE-WSW (or E-W) direction.

Key words : Korean Peninsula, Ulsan fault, Yangsan fault, active fault, reverse fault, late Quaternary, terrace surface

キーワード : 韓半島 (朝鮮半島), 蔚山断層, 梁山断層, 活断層, 逆断層, 第四紀後期, 段丘面

I. はじめに

韓半島 (朝鮮半島) の断層系は, ランドサット映像でも明瞭なリニアメント (線状構造地形) としてよく表現されている (Kang, 1979, 1981; 星野・村岡, 1982)。これは現実の地形としては, 低地や谷地形の連続として追跡され, それらの中でもとくに韓半島東南端部の梁山 (Yangsan) 断層系と蔚山 (Ulsan) 断層系の直線性が顕著である (図1)。これらは延長距離も長いので, 韓半島の主要断層として注目され, 多くの研究がなされている (星野, 1985 a, b; Hoshino *et al.*, 1984; 禹, 1984; Yoon and Kim, 1990; Kyung, 1993)。前者は NNE-SSW 方向に, 後者は NNW-SSE 方

向に連続する。

梁山断層系は, 断層地形の直線状の配列・垂直の断層面・断層構造などの様子から, 右横ずれが卓越し, 東側の地帯が相対的に隆起している活断層であることがわかっている (岡田ほか, 1994)。高位段丘面とその構成層である礫層を切断することは, 1997 年春季に実施した数カ所のトレンチ調査事例でも明らかにされ, この断層が高位面形成以後も活動したことは確実となってきた (岡田ほか, 1997)。

一方, 蔚山断層系に関しては, 蔚山市街地北部付近での海成中位面の高度は約 10 m 北側が高く, 上下方向に食い違っていることが指摘されている (呉, 1977; Oh, 1981)。これは, 段丘面形成以

後も断層活動が存在することを示唆した貴重な研究である。これまでも蔚山断層系に沿う地域の地質学的な調査・研究は行なわれてきた(朴・尹, 1968; 韓国地質鉱物研究所, 1973; 韓国動力資源研究所, 1981, 1985)が, 変位地形や第四紀後期に活動したことを示す確実な地質学的証拠は得られていなかった。また, Ryoo (1997) は礫層と花崗岩類が断層関係で接触する露頭が蔚山断層系で存在することを指摘しているが, この礫層の時代を究明しておらず, 構造地質学的な観点での考察にとどめている。

本研究では, 活断層の変位地形が蔚山断層系に沿っても存在し, 段丘堆積物を明らかに変位させる断層露頭が確認されたことを報告する。このような第四紀末期の新しい断層活動に関する確実な証拠を提出することは韓半島において初めてであり, この地域の活構造や地震活動を考察・検討する上できわめて貴重である。韓半島における地球科学的重要性のみならず, 地震防災や耐震建築を考える上でも研究の意義は大きい。

II. 地形・地質概要

韓国東南部は山地と低地が交錯した複雑な地形配列をなす(図1)。千数百 m より高い峰を有する山地はなく, 多くの山地塊が散点的に広がる。それらの斜面は比較的急傾斜であるが, 山麓部にはベディメント(ないし岩石床)状の緩斜面が分布する場所も多い。河床部は沖積平野面が幅広く発達し, 現河床からの比高の小さな河成段丘面が部分的に認められる。

慶州(Kyeongju)市から蔚山市へ至る地域より東側の山地は, 標高1,000 m 以下の山頂が連なり, これらの稜線と山麓線はほぼ北北西-南南東方向ないし南北方向へ直線状に延びている(図1)。この山地部のさらに東側には, 標高200~300 m 以下の丘陵性山地が東西幅10 km 以内にみられ, その東方は日本海となる。

この山地の西麓には, 急傾斜面が40 km 以上にわたって連続する。この山麓に沿って, 1本ないし複数以上の断層が併走するので, これらの断層群は蔚山断層系と呼ばれ, この急斜面は蔚山断層

崖と名付けられている。

この断層崖付近は白亜紀後期の仏国寺(Bulguksa)花崗岩類や慶尚累層群の新羅統から構成されている。中新世の延日統亭子礫岩も局所的に分布するが, そこでの地形は低起伏山地をなす。これらの山麓部では, 新旧の扇状地面が連なり, 複合・合成扇状地として発達する(口絵1-1)。

調査地域は蔚山市の北北西方約20 km 付近であり, 蔚山断層崖の基部にあたる(図1)。この地域において, 空中写真や地形図(縮尺2万5千分の1および5千分の1)を詳しく判読し, 地形・地質学的な現地調査を数回実施した。その結果, 活断層の変位地形や地形・地質構造の特徴など, 蔚山断層系の第四紀後期における活動性に関するいくつかの新しい成果を得た。

III. 段丘面の区分・対比と構成物

蔚山断層系沿いに分布する河成段丘面は, 分布高度・連続性・開析度, 段丘堆積物の層相・風化程度, および段丘堆積物を被覆する古土壌などの特徴から, 高位面・中位面・低位面等に区分される(図2)。

本地域の河成段丘面は支流が流下する西ないし南西方向へ傾斜しており, 上流部では径1 m 以上の巨礫を含むことから, 土石流に起因した扇状地面として形成されたと判断される。これら段丘の形成年代を知るために有効なテフラや化石などはほとんど検出されていない。

しかし, 段丘面の上にはレス起源と思われる細粒堆積物からなる土壤層が認められ, これは低位面から中位・高位面になるほど厚くなり, 風化程度も増大する。この層厚は, 高位面では厚さ2 m にも達する場所もある。この土壤層はどこでもほぼ均質な細粒のシルト質の砂層からなっている。

成瀬ほか(1985)によれば, この土壤層中にAT火山灰が挟まれていることがあるという。また, 土壤層中の石英粒子のESR年代分析によれば, この周辺に露出する基盤岩石の年代に比べて著しく古い値を示し, 中国黄土の数値域にある。このような特徴からみて, 土壤層は主として中国大陸に起源をもつレス(土壌)と考えられる(成

図 1 韓国東南部の地形概形と梁山・蔚山断層系の概略位置。

基図の等高線は韓国国立地理院発行の 25 万分の 1 地勢図より等高線間隔 100 m を抽出。蔚山断層系に沿う枠は図 2 の範囲を示す。地形から推定した断層線は梁山主断層と蔚山断層のみ記入した。

Fig. 1 Generalized topography around the Yangsan and Ulsan fault systems.

The contours of 100 m intervals are drawn from the topographic map sheets of 1 : 250,000 scale. Boxes along the Ulsan fault system indicate the location of Fig. 2. Only the Yangsan and Ulsan fault systems are shown on this map.

瀬ほか, 1996)。これらの堆積物については現在も詳しい分析や測定が行なわれている。

1) 高位面と構成物

高位面は著しく開析され、樹枝状の分布形態を示し、尾根部分にのみ幅狭い平坦面を残している。この高位面は蔚山断層を境として、その東と西とでは分布高度が大きく異なる。東側での分布高度

は標高 230~245 m で、ここでは平坦面の保存状態がとくに悪い(図 2 の東部)。西側では標高 205~155 m に高位面が分布し、平坦面の保存状態は相対的に良好である(図 2 中央)。

これらの高位面はいずれも西南西方向に緩く傾斜している。その面上の等高線から、開析される以前の原面を推定すると、一連の扇状地面が復元

図 2 蔚山断層系中部の地形面分類と活断層.

慶尚北道慶州郡外東邑末方里から開谷里集落付近の地形面分類と活断層（蔚山断層）の位置。基図の等高線は5千分の1地形図から5m間隔を抽出。X-X'およびY-Y'は地形断面図（図6）の位置。

Fig. 2 Geomorphological map in the central part of the Ulsan fault, southeast Korea. The contour interval is 5m. The lines of X-X'・Y-Y' show the location of the cross-section.

される。さらに、粗粒の礫層から構成されていること、段丘礫に瓦状配列が認められることから、高位面が扇状地として形成されたことが推定される。

寺谷池（Sagok Pond：図2中央部）南方では、厚さ6～7mに及ぶ段丘礫層が観察されたが、露頭が少ないため全層厚は不明である。礫の最大粒

径は1m前後にも達する。亜角礫を主とし、小さな礫は完全なクサリ礫となっている。また、マトリックスも粘土化しているため、礫層はねじり鎌で容易に切断することができる。

2) 中位面と構成物

中位面は開析がやや進んでいるものの、原面の保存は比較的良好である。図2の北部と南部にま

とまって分布する。中位面でも南北に走る蔚山断層系の両側で分布高度が異なっている。

この段丘礫層の風化は高位面のそれより低く、一部がクサリ礫化している程度である。地表面付近には厚さ数十 cm 以下の赤黄色土壌 (2.5 Y, 5/6) が認められる。

末方里 (Malbang-ri) 北東の小谷南側の露頭 (図 2, Loc. 1) では、厚さ約 5 m の段丘礫層が花崗岩類を被覆している。この段丘礫層基底の不整合面より約 1 m 上方に層厚数 10 cm の黒色腐植層がみられたので、その上部の ^{14}C 年代を AMS 法により測定したところ、 $>41,170 \text{ yBP}$ (NUTA-3937) という値が得られた。この腐植層に含まれる木材は扁平化や炭化を受けておらず、繊維が明瞭に残されている。礫層も風化礫が少なく、比較的新鮮な層相を呈する。ここでの地表面近くでは、土壌層や風化殻などの厚さは数十 cm 以下である。

末方里東方の寺谷池北側の断層露頭 (後述：図 2, Loc. 2) では、断層上盤側の中位段丘堆積物は断層により大きく変位・変形している。この中に含まれていた腐植質シルト層の ^{14}C 年代を AMS 法により測定したところ、 $30,150 \pm 290 \text{ yBP}$ (Beta-113839) の値が得られた。この年代は予想された中位段丘堆積物の値としては若い。この場所は、中位段丘面の南端で寺谷池の開析谷に接している。図 2 に示すように、上流側に低位段丘面があり河谷沿いであるので、年代測定した地層は中位面から低位面への形成途次に局部的に堆積した堆積物である可能性もある。

3) 低位面および沖積段丘面と構成物

低位面およびこれより下位の段丘面は、ほとんど開析を受けておらず、現河川に沿って細長く分布する。

低位面は厚さ 2 m 程度の比較的薄い段丘礫層からなる。新鮮な礫のみで構成され、マトリックスの砂質層は明黄褐色 (10 YR, 6/6) を呈し、ほとんど風化は認められない。

成瀬ほか (1985) は、本調査域の北方 (仏国寺入り口南方の道路脇) で、本地域の低位面に対比される河成段丘面を覆う厚さ 40 cm の土壌層の中

から AT 火山灰を検出し、この土壌層が最終氷期の風成塵堆積物 (レス) であることを明らかにした。

したがって、ここでの低位面は最終氷期最盛期以前に形成され、AT 火山灰が降下した 2.4 万年前ころには離水していたといえる。

開谷里 (Kaegok-ri) 集落北東方の淵安川 (Yeonan Stream) 上流の Loc. 4 (図 2) には、現河床から比高 7~8 m の沖積段丘面が認められるが、この面は局部的に発達しその幅も狭いので図 2 には分布を示していない。この段丘面は侵食の激しい現河谷上流の谷中にあり、V 字形をなす谷底からの比高が小さいことからみても、きわめて新しい時期に形成されたことは確実である。

これを構成する段丘礫層が後述の断層露頭と共に河床脇の露頭でよく観察される。露頭の様子を図 5 に示すが、段丘礫層の中部に挟まれる腐植質層の ^{14}C 年代 (AMS 法) は $2,410 \pm 80 \text{ yBP}$ (NUTA-5260) と測定された。暦年代の較正值は 29.4 % 確率で、759-677 BC である。

この露頭の北西側では段丘面がやや急勾配になり、比高約 2 m の低崖がみられる。露頭から約 20 m 西側付近で、低崖基部にあたる地表面直下の位置で黒色腐植土層 (黒ボク状土壌) を採取した。その ^{14}C 年代は $730 \pm 90 \text{ yBP}$ (NUTA-5261) であり (図 5)、その暦年代較正值は 70.7 % 確率で 1220-1319 AD である。

IV. 断層変位地形と断層露頭

調査地域においては、中位段丘面・高位段丘面ともに蔚山断層系を境に分布高度が不連続的に変化し、低崖を境にいずれも山 (東) 側が高くなっている (図 2 ; 口絵 1-2)。段丘面の平面的な形状は西側に木の葉状に広がり、これらの低崖を隔てても東と西ではほぼ同じである。また、構成層の層相や層序も共通しているので、両者はほぼ一連のものとして対比される。この低崖は、地形面の新旧によって崖高が異なるものの、段丘面を横断する崖地形として連なる。これがもし河蝕崖とするならば、崖下 (西側) の段丘面に崖と併走する旧流路地形が認められたり、崖の走向方向 (南北方

向)に地形面が傾いていたりするはずである。しかし、ここではそのような現象は認められず、両側の段丘面は同様な傾きをもって南西方向へ傾斜している。したがって、新旧の段丘面を横切るこのような低崖は、河食崖として形成されたものとは考えられない。

さらに、低崖はほぼ直線ないし緩やかに湾曲して配列し、その比高は低位の地形面で小さく、高位の地形面で大きい(図2)。このことは断層運動の累積性を示すことに他ならず、これらの低崖が低断層崖であることを意味している。

以上の地形的な特徴から、これらの段丘形成期およびそれ以降に蔚山断層系が繰り返し活動し、新旧の段丘面に累積的な変位を与えてきたことは確実である。

このような地形的な証拠を空中写真判読によって確認した上で、現地調査の際に露頭での確認調査を実施した。その結果、以下に述べるような断層露頭が新たに見出された。活構造に関連する露頭や地質構造と、蔚山断層系による各段丘面の変位地形と上下変位量などについて以下に述べる。

1) 寺谷池北岸(末方里集落の東方)の断層露頭

慶尚北道慶州郡外東邑末方里(Malbang-ri, Wedong-eop, Kyeongju-gun)集落の東方に寺谷池がある。この北岸の露頭(図2, Loc. 2)で、破碎した花崗岩が礫層の上に衝き上げている様子が観察される(図3; 口絵1-3, 4, 5)。ここでの断層面の走向はほぼ南北であり、傾斜は $25^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{E}$ である。

上盤側では、中位面を構成する砂礫層(層厚約3m)が花崗岩を不整合に覆っている。砂礫層下部は段丘の基底礫層で中礫から大礫で構成されている。上部は細礫～小礫、および腐植質シルトを交える砂層となっているので、堆積構造(層理)がよくわかる(図3-A)。この腐植質層の ^{14}C 年代測定値については前述したが、断層に近づくにつれて礫層や砂礫層は大きく湾曲し、断層で急に切断される。とくにシルト交じりの砂層は連続性がよいので、変位や変形の様子を究明しやすい。約3万年前と測定された腐植層はほぼ直立していた。

下盤側では、比高約7～8mの露頭全てが砂礫

層で構成されている。露頭下部の礫層は風化がより進んでいるので、中位面構成層より古い可能性がある。上部の砂礫層は相対的に新鮮であり、この部分が中位面構成層と推定される。下盤側の上部でも礫径は細くなり、細礫・小礫が卓越し、最上部では砂層・シルト層を挟むようになる(図3-A)。

主断層面は上述のように東方に傾斜している。露頭下部では、明瞭な断層面は1面だけであり、これに沿って軟弱な幅数十cmの断層粘土帯が伴われている。露頭上部になると、上盤の礫層と砂礫層・腐植質層が引きずられるように強く変形している。これらの地層が急斜した部分では、併走・分岐する数本の断層が伴われている。その中部(^{14}C 年代測定値周辺)では、砂礫層がほぼ直立したり、逆転したりして、幅数十cmの断層帯となっている。

下盤側には、主断層から分岐した1本の断層があり、砂層・シルト層の変形状態から、これも逆断層と考えられる。主断層との接合部付近には礫が多いので、断層(面)の存否や分岐の様子もわからない。

この露頭での断層は、下部では単一の断層面をなすが、上部では全体として地表面に向かって拡散するように分岐した低角逆断層群となっている。

なお、この寺谷池は冬季に樋門の修繕などのために水を落とすことがあり、露頭下部の観察はこのような状態の時に行った(口絵1-3)。通常では水が蓄えられているため水没しており、観察はできない(口絵1-4)。

2) 寺谷池北岸のトレンチ調査

上記の寺谷池北岸での断層露頭の観察・記載を受けて、Kyung *et al.* (1996)によってトレンチ掘削調査が行われた。掘削場所は露頭の北側約20mの中位段丘面上であり、ほぼ東西方向に調査溝が掘られた。

図3-Aと同様にトレンチ下部には巨大礫が露出したので、地表から約3mまでしか掘削できなかったが、ほぼ地表にまで達する断層が観察された。このトレンチ南壁面のスケッチが図4である。断層は砂礫層を切断して東方へ $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ で傾斜する。

図 3 蔚山断層系沿いの断層露頭のスケッチ。
A : 末方里集落の東方、寺谷池北岸の断層露頭上部スケッチ。

A の上の図は断層露頭の全体図、A 図は露頭上部の詳細スケッチ。

B : 寺谷池北岸の断層露頭下部スケッチ。

Fig. 3 Sketch of the fault outcrop along the Ulsan fault at the north bank of the Sagok Pond.

A : Upper part of the fault outcrop at the Sagok Pond.

B : Lower part of the fault outcrop at the Sagok Pond.

断層面は下部では1本であるが、地表面に向かって数本に分岐する (Kyung *et al.*, 1996)。

3) 淵安川河床 (開谷里集落北東方) の断層露頭

淵安川 (Yeonan Stream) は慶州郡外東邑開

谷里 (Kaegok-ri) 集落の北東方を南西方向へ流下する (図2)。上流は山地 (蔚山断層崖) や段丘を開析しているの、河床や両側谷壁に露頭が連続して観察できる。上流部に城池 (Seong Pond) があり、この下流約 300 m の河床北西脇露頭 (図

図 4 蔚山断層のトレンチ壁面のスケッチ.
寺谷池北岸の低断層崖を横切って掘られたトレンチ南壁面のスケッチ. (Kyung *et al.*, 1996 による)
Fig. 4 Sketch of the south wall of the trench excavated across the Ulsan fault at the north side of the Sagok Pond. (after Kyung *et al.*, 1996)

図 5 開谷里集落北東方、淵安川河床の断層露頭スケッチ.
北側の断層露頭の概略的な様子を示した.
Fig. 5 Sketch of the fault outcrop along the Ulsan fault of the Yeonan Stream (Wedong-eop, Kyeongju-gun, Kyeongsang-bukdo).
Generalized sketch of the fault outcrop at the north bank along the Stream.

2, Loc. 4) で断層が観察された。

この露頭では、やや風化した礫層の上に基盤岩石である花崗岩類が突き上げている (図 5; 口絵 1-6, 7)。断層の走向・傾斜は NS (~NNW-SSE)

で、 $25^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{E}$ である。上盤の花崗岩類側には並走する断層 (破碎帯・粘土帯) が何本も伴われているので、蔚山断層はかなり長期間にわたって大規模に活動してきたことがわかる。

下盤側は礫層であり、南側に緩く傾斜しているが、断層近くなると引きずり変形を受けて急傾斜している。マトリックスは粗砂や小礫～中礫を主とした粗粒堆積物であり、腐植質層や粘土質層を伴わないので、この堆積年代や環境については判明していない。

花崗岩と礫層の境界をなす主断層の上部には新期の段丘堆積物がみられない（図5）ので、段丘堆積物と断層変位の年代との関係を議論することはできない。しかし、主断層の東側を平行する断層群は沖積段丘堆積物で不整合に覆われ、この中の腐植質層の ^{14}C 年代は約2,400 yBP（前述）であるので、これ以降の新しい変位は随伴する断層群にはない。

既述のように、この露頭の北西方約20 mの地表面近くで黒色腐植土層を採取し、その年代測定値（750 yBP）を得た（図5）。断層露頭の北西延長にあたる沖積段丘面がやや急傾斜となっているので、この部分は低断層崖の可能性もある。その崖麓に位置する地表面下から腐植土層を採取したのであるが、段丘面上は水田を作る時に1 m前後の人工的な段差が作られている。

図5の露頭では、段丘堆積物は主断層を覆っていない。この延長上の段丘面も人工改変を蒙っているため、1～2 mの以下の上下変位が地形面の形成後にあったかどうかはわからない。

この付近の沖積段丘面はかなり急勾配であり、

現在では階段状の水田に改変されている。段丘構成層は巨礫を含む粗粒堆積物であり、この堆積以後の変位の有無は露頭条件の制約もあって、今のところ確定的にはいえない。しかし、図5の主断層の上盤側にある沖積段丘堆積物は主断層近傍でも地層や礫の乱れが認められないので、この堆積以後の新しい動きは否定的である。

4) 低断層崖の地形縦断面

地形面の連続性・低崖の方向と位置・断層露頭の位置などからみて、中位段丘面と高位段丘面は蔚山断層で切断されており、それらの間の低崖は低断層崖であるとみなされることはすでに述べた。

これら段丘面形成以後の上下変位量を求めるために、低断層崖にはほぼ直交し、段丘面の最大傾斜方向へ横切る簡易的な測量を2本の測線で実施した。そのうちの1本は、末方里集落の東方にあたる位置（寺谷池北岸）で実施した。ここでは中位段丘面上において、低断層崖を挟んで東北東-西南西方向に約400 mにわたって測量した（図6，X-X'）。この断面では、約5 mの上下変位量が中位段丘面の形成以後に生じたことがわかる。

寺谷池南方約200 mの高位面を横切る断面では、約15 mの上下変位量が求められた（図6，Y-Y'）。高位面の形成以後に、この量に達する上下変位が生じたことがわかる。このように高位面は中位面より大きく上下方向に変位している。

なお、断層面の傾斜を考慮すると、上下変位量

図6 蔚山断層の低断層崖を横切る地形縦断面。

Y-Y': 高位段丘面, X-X': 中位段丘面, 各断面の位置は図2の中に示す。

Fig. 6 Topographic cross-sections across the scarplet of the Ulsan fault.

Y-Y': higher terrace, X-X': middle terrace. Each line is shown in Fig. 2.

図 7 末方里集落の東方における段丘堆積物に見られた液状化現象のスケッチ。
中位段丘堆積物上部の砂・シルト層の液状化現象を示す。

Fig. 7 Sketch of the liquefied phenomena observed in the middle terrace deposits at the northwest of the Sagok Pond.

の約2倍に及ぶ東西方向からの水平短縮量が推算される。

5) 液状化現象

末方里集落東方の寺谷池北岸断層露頭近くの水田脇露頭(図2, Loc.3)では, 中位面構成層の上部が観察される。この最上位層のシルト質層が液状化現象によって, 変形していることが確認された(図7; 口絵1-8)。ここでは, いくつかの砂脈が下位のシルト質砂層を基材として, 上位へ稲妻型に延び上がり, 土壌層下部でラッパ型に広がっていた。

このような地質と断面形態から, これらの堆積物が地下水で飽和されている時に生じた液状化現象とみなしたが, 当域でも JMA 震度階で V 以上にあたる激しい地震動を受けてきた証拠として貴重である。

V. 考 察

1) 蔚山断層系の変位様式と活動履歴

蔚山断層崖に沿って急傾斜面や三角末端面の地形が連なるが, この麓に沿って複合・合成扇状地が発達する。こうした開析扇状地面(とくに中位段丘面と高位段丘面)を切断する低断層崖が, 断

層崖麓に沿って検出された。これを連ねる断層線は北北西-南南東方向であるが, かなり湾曲している。また, 断層線が段丘面や河谷を横切る部分には系統的な屈曲は認められない。

変位地形の連続性から認定された断層線に沿って, 砂礫層を切断する断層露頭が数カ所で確認された。これらのうち末方里東方の寺谷池北岸では, 中位段丘面とその構成層が切断されている。この下部では花崗岩類が砂礫層へ突き上げており, 接触面がよく観察される。上盤側の砂礫層の上部は約3万年と測定され, これ以降にも断層活動があったことがわかる。

寺谷池北岸北側で行なわれたトレンチ調査では, 中位段丘堆積物を切断する逆断層が観察されている(Kyung *et al.*, 1996)。断層下盤の堆積物上部には, ラミナ状を呈する灰白色砂と赤褐色のシルト層との混合層がみられる。Kyung *et al.* (1996) はこれを最終氷期最盛期に形成されたクリオターベーション(cryoturbation)とみなし, その形成時期は韓国の他地域の年代測定値との比較から約25,000年前としている。そして, その後少なくとも3回の断層活動(Event)があったことを指摘している。Kyung *et al.* (1996) の論

文は速報的なものであるため、詳しい Event 認定の根拠を記述していない。

開谷里北東の断層露頭では、花崗岩類とやや風化した礫層との断層関係は明瞭であるが、この主断層は沖積段丘堆積物に被覆されていないので、これとの直接の関係はわからない。また、この付近の沖積段丘面はかなり急勾配であり、水田を作るため階段状に大きく地形改変されたので、地形面形成以後の変位の有無は検討できなくなっている。ここでの段丘堆積物は巨礫を含む粗粒礫層であり、トレンチ掘削調査も容易でない。しかし、最新活動の時期を限定する上で重要な場所であるので、将来の調査に期待する。

寺谷池や開谷里北東の露出で観察されることは、蔚山断層系は逆断層が卓越した断層運動であり、その最新活動は第四紀末の2~3万年以降である。今回観察した断層露頭で、断層運動の Event を解読できる十分な証拠は検出できなかった。したがって、活動履歴についてはまだ確実な資料が得られておらず、今後の重要な研究課題である。

2) 変位の累積性と平均上下変位速度

蔚山断層系は中位面・高位面を確実に変位させている。それらの上下変位量は、それぞれ約5mと15mである。こうした上下変位量には明らかな累積性が認められ、蔚山断層系は少なくとも高位面形成以後に複数回の活動を行ってきたことがわかる。高位面は中位面の3倍の上下変位量を持ち、さらに多くの Event を経験していることになる。

ところで、日本においては、最終間氷期最盛期に赤褐色~褐色の風化帯が広範囲にわたって形成されたことが指摘されている(松井・加藤, 1962)。また顕著な赤色土壌層は、約50万年前以降の温暖期の繰り返しによって形成されたと考えられている(Sakaguchi and Okumura, 1986)。

日本列島の高海面の大半は第四紀後期における間氷期の高海水準期に、山地内で比較的厚い堆積層を伴って広範囲に広がる河成段丘面は第四紀後期の氷期に、それぞれ形成されたことが判明してきた(貝塚ほか, 1995)。通常よく発達する河成段丘面群は、低位面群が完新世(酸素同位体

ステージ1: Maritinson *et al.*, 1987)に、中位面群が最終間氷期(酸素同位体ステージ5)に、高位面群がこの1つ前の氷期(酸素同位体ステージ7)に大分される。河成段丘面群は低位-中位面群が最終氷期(酸素同位体ステージ3~4)に、高位面群がこの1つ前の氷期(酸素同位体ステージ6)などに大きく分けられる。

これら各ステージには詳しい絶対年代値(2: 2万年前頃, 3~4: 約3~6万年前, 5: 7~12万年前, 6: 14~20万年前, 7: 22~27万年前)も入れられている(Maritinson *et al.*, 1987)。韓半島と日本列島は広域的な地殻運動や起伏量などに相違があるものの、同じような緯度や気候帯にあり、一部にみられるレス土壌や火山灰層からみても、上記の地形面群の大区分やステージ対応は韓半島にも適用できるとみなされる。こうした年代観を採用すれば、高位河成段丘面の年代は20~14万年前、中位河成段丘面は5~6万年前であると推定できる。また、低位河成段丘面は、前述の地形面の状況、堆積物の層相、 ^{14}C 年代測定値、レス・火山灰層序学的対比などから、最終氷期の最盛期(2~3万年前)に形成されたと推定される。

このような地形年代観を韓半島地域に適用することはあまりに安易であるが、当域に分布する河成段丘面の形成年代を決定できる資料は、今のところ十分ではない。土壌層や火山灰層などの分析から考察中であるが、この推定年代と実際の年代が桁違いに異なる可能性は小さいと考えられる。そこで、蔚山断層系の上下平均変位速度を試算するために、下記のように仮定する。

中位河成段丘面と高位段丘面の上下変位量5mと15mを、それぞれの推定年代値(中位面: 5~6万年, 高位面: 14~20万年)で割ると、上下方向の平均変位速度は約0.1~0.08 mm/yとなる。したがって、上下平均変位速度からみると、蔚山断層系はC級上位の活断層に区分される。

3) ネオテクトニクスの中での位置づけ

a) 広域応力場

韓半島で発生した浅発地震の発震機構が求められているが、それらの最大主圧力軸はENE-WSW方向であり、韓半島は圧縮性の応力場にあ

ることが明らかにされている（尾池，1984；Xu *et al.*, 1989；Jun, 1991；Xu, 1994）。こうした主圧力軸方向は梁山断層系の右横ずれ運動（岡田ほか，1994）を許容するものである。

また，蔚山断層系は北北西-南南東走向で，東方へ約 30° で傾斜し，横ずれをほとんど伴わず，ほぼ純粋な逆断層運動を示す。したがって，水平最大圧縮軸は蔚山断層の走向と直交する ENE-WSW 方向が求められる。こうした地震の発震機構・梁山断層系の右横ずれ・蔚山断層系の逆断層運動は別々の指標によって得られた圧縮方位であるが，相互にほぼ一致する。したがって，韓半島は第四紀以降にこのような広域応力場に置かれ，こうした圧縮作用が現在も働いているといえる。

さらに，こうした応力場は現在ほぼ東西の圧縮応力場に置かれている西南日本とも調和的である。西南日本にみられる東西圧縮は 0.5 Ma 以降に顕在化したものであり（藤田・太田，1977），それ以前の水平主圧縮応力軸の方向はほぼ南北であったとされている（山元，1991）。したがって，西南日本の日本海側における応力場が韓半島南東部と類似したものであれば，梁山・蔚山断層系の活断層運動を許容する応力場は最新地質時代ではほぼ第四紀に限られる。

b) 地震活動と活断層

現在の韓半島では，いわゆる直下型の大地震活動はかなり低調である。しかし，歴史時代を遡ってみると，被害地震は各地でかなり発生している（図 8；Kyung and Lee, 1993）。とくに，調査地域（慶州市～蔚山市域）付近では，数個の歴史的な被害地震が発生している。すなわち，西暦 779 年 3 月に慶州市付近で MM 震度：IX，1757 年 10 月に大浦半島基部（緯度 35.9° ，経度 129.5° ）で震度：IX，1643 年 6 月に蔚山市付近（緯度 35.6° ，経度 129.4° ）で震度：X の地震が発生している。これらの発生地域は，梁山断層系の中央部付近であったり，蔚山断層系やそれが東方へ傾斜している断層面上に位置したりすることから，これらの活断層に関連した地震である可能性が高い。

なお，1997 年 6 月 26 日に慶州市付近に発生した地震は， $M=4.3$ ，震源の深さは約 14 km であ

図 8 韓半島で発生した歴史大地震の震央。大被害を引き起こした MM 震度階 IX 以上の歴史地震の震央分布を示す。（Kyung *et al.*, 1996 による）

Fig. 8 Epicenters of the great historical earthquakes in Korean Peninsula.

Epicenters greater than 9 of the MM intensity and associated with severe damage are shown on this map. (after Kyung *et al.*, 1996)

り，震央は北緯 $35^\circ 48'$ ，東経 $129^\circ 14'$ 付近とされ，調査地に近い。発震機構は不明であるが，内陸直下型の地震であり，梁山や蔚山断層系に関連している可能性がある。

蔚山市・慶州市・浦項市は韓半島東南部に位置

し、韓国の重要な人口密集地であり、近代的な工業都市域である。これらの都市の耐震対策や都市計画のためにも、梁山・蔚山断層系のさらに詳しい調査が必要であり、現在も調査中でもある（岡田ほか、1997）。

VI. ま と め

蔚山断層系の中央部で空中写真判読・地形図解読を行ない、その後に現地では地形・地質調査を実施して、下記のような事柄が判明した。

1. 蔚山断層系は北北西-南南東方向ないし、ほぼ南北方向へ走り、断層線はやや湾曲している。この線上で中位面と高位面が変位し、東上がりの上下変位が認められる。断層線を横切る段丘崖・河谷・尾根などには系統的な横ずれ屈曲は認められず、下記の断層露頭での状況とも考え合わせると、この活動様式は典型的な逆断層であることがわかる。

2. 低断層崖の地形縦断測量から、中位面は約5 m、高位面は約15 m 上下方向へ変位し、これらが形成されて以降の変位量や累積的な変位が認められた。段丘面の変位方向と断層崖の向きは一致し、東側の山地域が少なくとも第四紀の中ごろから継続的に隆起していることがわかる。

3. 調査地域に発達する地形面はいずれも扇状地性の開析河成段丘面群である。これら段丘面の開析-保存状態・段丘堆積物の層相や風化程度・堆積物を覆う土壌層の対比などから、中位面と高位面の形成年代を概略的に推定した。それによれば、上下平均変位速度は0.1~0.08 m/千年程度のC級上位である。

4. 蔚山断層系に沿って、明瞭な断層露頭が2カ所で観察された。末方里集落東方にある寺谷池北岸では、破碎した花崗岩が中位面を構成する礫層の上に衝上している。その断層面の走向はほぼ南北であり、傾斜は25~30° E である。開谷里集落北東方の淵安川河床（城池の下流約300 m）北西側露頭でも、やや風化した礫層の上に花崗岩類が25~30° E の傾斜で衝上している。両露頭では、堆積物は引きずりや撓みを受けて、大きく変形している。

5. 末方里の寺谷池北岸露頭では、上部が約3万年前と測定された砂礫層も確実に断層変位を受けている。この北側で実施されたトレンチ調査でも地表面にまで達する断層面が確認され、最終氷期以降の複数の活動が観察されているので、蔚山断層系は第四紀末まで活動を繰り返してきた活断層であることがわかった。

6. 末方里集落東方の寺谷池北西の露頭では、中位面構成層の上部がよく観察され、この最上位層のシルト質層が液状化現象によって変形している。ここではいくつもの砂脈が下位のシルト質砂層を基材として、上位へ稲妻型に伸び上がり、土壌層下部でラッパ型に広がっている。中位面構成物はその堆積中ないし直後に液状化現象を受けたことを示唆する。

7. ほぼ南北方向の蔚山断層系が逆断層性の活断層であることは、当域も東北東-西南西方向ないし、ほぼ東西方向からの圧縮性の広域応力場に置かれていることを示唆する。これは北北東-南南西方向の梁山断層系が右ずれを示すこととも符合し、同じ応力場にあることを意味する。韓半島南部の応力場だけでなく、西南日本や周辺地域のネオテクトニクスを考察する上でも貴重な成果である。

謝 辞

本研究は1995年度地球惑星科学関連学会合同大会（日本地震学会、日本大学文理学部）で概要を発表した。調査に要した経費の多くは文部省科学研究費（国際学術調査）「韓国南東部の活断層系における大地震再来時間の評価、課題番号：06041060」を使用した。その後に行われた韓国との共同研究や私費による調査成果も取り入れている。図3Bの作成には、山路 敦・秋元和実・入月俊明の各氏の助力を得た。成瀬敏郎・竹村恵二両氏には断層露頭の現場に同行して戴き、中段段丘面上の土壌層の分析をお願いした。

文 献

- 星野一男（1985 a）：写真で見る韓国の地層。地質ニュース、366、21-27。
星野一男（1985 b）：コリア半島の造構運動の概略。地質ニュース、366、28-42。
星野一男・村岡洋文（1982）：LANDSAT 映像よりみ

- た韓国の地質構造. 地質調査所月報, **33**, 420-421.
- Hoshino, K., Kang, P.C. *et al.* (1984): *Research on interpretation of geological structures by remote sensing technique*. ITIT (Project No. 8014), 45p.
- 藤田和夫・太田陽子 (1977): 第四紀地殻変動. 日本第四紀学会編: 日本の第四紀研究. 東京大学出版会, 127-152.
- 韓国地質鉱物研究所 Korea Institute of Geology and Minerals (1973): 25 万分の1 地質図「釜山」「安東」.
- 韓国動力資源研究所 Korea Institute of Energy and Resources (1981): 100 万分の1 韓国地質図.
- 韓国動力資源研究所 (1985): コリア半島の地史. 地質ニュース, **366**, 7-15.
- Jun, M.S. (1991): Body-wave analysis for shallow intraplate earthquakes in the Korean Peninsula and Yellow Sea. *Tectonophysics*, **192**, 345-357.
- 貝塚爽平・成瀬 洋・太田陽子・小池一之 (1995): 日本の平野と海岸 (新版日本の自然4). 東京大学出版会, 248p.
- Kang, P.C. (1979): Geological analysis of Landsat imagery of South Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, **15**, 109-126, 181-191.
- Kang, P.C. (1981): Geological evolution of Korea and structural analysis of Korean transect area. *CCOP Bulletin*, **14**, 31-51.
- Kyung, J.B. (1993): Correlation of earthquake occurrences with topography and lineaments in south Korea. *J. Korean Earth Science Society*, **14**, 482-491.
- Kyung, J.B. and Lee, K.W. (1993): Pattern recognition study of large earthquake occurrences in the Korean Peninsula (II). *J. Geol. Soc. Korea*, **29**, 61-72.
- Kyung, J.B., Oh, K.S. and Oike, K. (1996): Paleoseismological approach in the southeastern part of the Korean Peninsula. *1996 Symposium on Seismology in East Asia Proceedings, Korea Inst., Geol. Mining & Materials*, 38-47.
- Marintson, D.G., Pisias, N.G., Hayes, J.D., Imbrie, J., Moore, T.C.Jr. and Shacklton, N.J. (1987): Age dating and orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quat. Res.*, **27**, 1-29.
- 松井 健・加藤芳郎 (1962): 日本の赤色土壌の生成時期・生成環境に関する二, 三の考察. 第四紀研究, **2**, 161-179.
- 成瀬敏郎・井上克弘・金 萬亭 (1985): 韓国の低位段丘上に堆積するレス状土壌. ペドロジスト, **29**, 108-117.
- 成瀬敏郎・柳 精司・河野日出夫・池谷元伺 (1996): 電子スピン共鳴 (ESR) による中国・韓国・日本の風成塵起源石英の同定. 第四紀研究, **35**, 25-34.
- 呉 建煥 (1977): 韓半島南東部海岸の地形発達. 地理学評論, **50**, 689-699.
- Oh, G.H. (1981): Marine terraces and their tectonic deformation on the coast of southern part of the Korean Peninsula. *Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo*, **13**, 11-61.
- 岡田篤正・渡辺満久・佐藤比呂志・全 明純・曹 華龍・金 性均・田 正秀・池 憲哲・尾池和夫 (1994): 梁山断層 (韓国東南部) 中央部の活断層地形とトレンチ調査. 地学雑誌, **103**, 111-126.
- 岡田篤正・渡辺満久・鈴木康弘・成瀬敏郎・竹村恵二・慶 在福・谷口 薫・尾崎陽子・長井朋代・植木岳雪・下角哲也 (1997): 梁山断層系南部 (韓国) における第四紀断層運動の評価. 日本第四紀学会講演要旨集, **27**, 80-81.
- 尾池和夫 (1984): 東アジアの地震活動. 藤田和夫編著: アジアの変動帯—ヒマラヤと日本海溝の間—. 海文堂, 89-107.
- 朴 陽大・尹 亨大 (1968): 5 万分の1 地質図幅「蔚山」および同説明書. 韓国国立地質調査所, 20p.
- Ryoo, C.R. (1997): Fault system in the south-eastern Korea: 'Kyongju' horsetail structure as a new synthetic interpretation. Lee, Y. and Kim, J.H. eds.: Tectonic evolution of Eastern Asian continent. *Geol. Soc. Korea, 50th Anniv., Int' Symp.*, 22-27.
- Sakaguchi Y. and Okumura K. (1986): Interglacial climates and relic red soils in northern Japan based on pollen records of interglacial deposits in eastern Hokkaido. *Bull. Dept. Geogr., Univ. Tokyo*, **18**, 29-48.
- 禹 柄栄 (1984): 梁山断層の地形学的研究. 慶北大学校碩士学論文, 41p.
- Xu, J.R. (1994): Seismogenic stress field and tectonics in east Asia. *Mem. Fac. Sci., Series of Physics, Astrophysical, Geophysics and Chemistry, Kyoto Univ.*, **39**, 49-69.
- Xu, J.R., Zhao, Z.X., Oike, K. and Ishikawa, Y. (1989): Regional characteristics of shallow earthquakes in and around China. *Proc. Japan-China (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation Kyoto, Japan*, 41-49.
- 山元孝広 (1991): 日本列島の後期新生代岩脈群構造構応力場. 地質調査所月報, **42**, 131-148.
- Yoon, S. and Kim, J.Y. (1990): Tectonic history of the Yangsan Fault, southwestern part of the Korean Peninsula. Tsuchi, R. ed.: *Pacific Neogene Events, their timing, nature and interrelationship*. Univ. Tokyo Press, 151-160.

(1998年4月8日受付, 1998年5月25日受理)