

# 地質事象における「活」の諸問題

加藤 碩一\*

What is “active” in geological issues  
such as “active” faults and “active” volcanoes?

Hirokazu Kato\*

## Abstract

The definition of “active” in geological issues such as active volcano, active fault, active fold, and active tilt etc. has not been established in the strict sense. It has rather changed with the progress of their research and study. Especially in terms of active faults, although the definition has not reached consensus internationally in the academic level, the evaluation of individual active fault which affects severely the social and economic circumstances has been preceding the consensus. The subject of this paper is to examine the vague definition of “active” and related problems on studying “active faults” so that the concept and recognition of them will be shared.

**Keywords:** active volcano, active fault, active fault map, earthquake, earthquake fault, earthquake source fault, surface earthquake fault

## (要 旨)

活火山や活構造（活断層・活褶曲・活撓曲）などの地質事象における「活」の定義は、必ずしも学術的に厳密に規定されているわけではない。むしろ、調査研究の進展に伴い変遷している。特に活断層については、単に純学術的なレベルにおける国際的な合意が未達であるにも関わらず、社会経済的に重要な影響を及ぼす個別の活断層に関する評価が先行している状況は懸念される。本論では、あいまいともいえる「活」の定義や、それに関わる「活断層」研究の問題点を検討し、その概念や現状認識を共有する一助となることを願うものである。

**キーワード：**活火山，活断層，活断層図，地震，地震断層，震源断層，地表地震断層

---

\* 応用地質(株)エンジニアリング本部

\* OYO Corporation Engineering Headquarters

## 1. はじめに

現今の活断層問題は、単に純学術的な探究にとどまらず、その結論が原子力発電所立地・再稼働や高レベル放射性廃棄物・二酸化炭素の地下処分問題など短長期にわたって社会的に甚大な影響を及ぼすものである。しかしながら現状の活断層調査研究においては、例えば「活断層調査では、はっきりした証拠をもとに断言できるようなことは少ない。研究者それぞれに解釈が違う」（山崎晴雄（首都大学東京・地震地質学）、読売新聞朝刊、2013.3.29）という段階にもかかわらず、短期間のトレンチ調査や限定的な調査に過度に依存し、その活動性などを十分に吟味することなく、したがって研究者間の合意を得ることなくいわゆる「活断層」の有無はおろか「活動性を否定できない断層は活断層とみなす」としたみなし基準をよりどころに社会的影響度の極めて高い判断が性急に下されることが懸念される。

最近では、関東地方の「立川断層帯」のトレンチ調査の事例があげられる。本断層帯は、名栗断層と立川断層で構成される全長約 33 km の活断層帯である。すでに政府の地震調査委員会 ([http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hokokukaigi01Bhtm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hokokukaigi01Bhtm)) は、本断層が引き起こす地震規模を M7.4 と推定し、今後 30 年以内の地震発生確率を最大 2% と算出し、これに基づく東京都による被害想定は、最大で死者 2600 人、建物被害 8 万 5700 棟とされている。従来の研究結果では、平均変位速度は 0.2-0.3 m/1000 年（横ずれ成分不明）、最新活動期は約 2 万年前以後かつ 1 万 3 千年前以前で平均活動間隔（再来周期）は 1 万～1 万 5 千年程度とされている。断層変位の横ずれ成分の詳細が不明だったことなどから文部科学省予算による大規模なトレンチ掘削が日産自動車村山工場跡地（東京都武蔵村山市）において 2012 年から実施され、佐藤比呂志東大地震研究所教授（立川断層帯調査チーム代表）らはトレンチ掘削面において横ずれ型断層に特徴的な並び方の白い岩石があり、2013 年 2 月に（横ずれ）断層と報告したが、すぐにセメントを含む人工物を誤認した結果と判明した。調査研究の進捗によって従来の結果がより精密化され、あるいは訂正されることはあり得るが、そもそもその存在や基本的なパラメータが否定されるようでは、活断層研究の有意性に疑念が持たれかねない。もちろん、この事例においても活断層としての「立川断層帯」そのものが否定されるわけではなく、今後とも横ずれ変位の検証などより精細な調査研究が推進されるべきであることは言うまでもない。なお、すでに、水平ずれが卓越する一連の地表地震断層において水平変位は同じ方向を保つが、垂直ずれの方向は転換するという指摘がなされている<sup>1)</sup>。こうした横ずれ断層に伴う垂直変位は向きや量も一様ではなく、数 m から数 10 m の範囲でも異なることがしばしば認められる。山崎断層<sup>2)</sup> や丹那断層<sup>3)</sup> の調査でも

とくに顕著に認められた。はなはだしい場合には、断面だけの観察では高角度の逆断層あるいは正断層と見られるのがふつうであるとも指摘されている<sup>4)</sup>。このことは横ずれ断層線に直交するトレンチ面や露頭面で必ずしも縦ずれ成分の定向的累積性が見られないことを示唆し、活断層の活動性評価に際して留意すべき点である。

反面、近年従来の調査結果、例えば活断層長について新たな調査研究でより長い活断層の存在が明らかとなったり、海底断層の活動による想定以上の陸域の震動が生じた事例が報告されており、活断層の認定・評価に関する実用的な詳細情報の獲得はいまだ道遠しの感も否めない。

このような研究レベルの現状にもかかわらず、原子力規制委員会が原発の重要施設の真下に活断層が確認されれば、稼働を認めないという厳しい基準を設定し、また、活断層の活動履歴を場合によっては従来より大幅に過去に遡り 40 万年前まで調べるべきだと提示してもいる（後述）。すでにアメリカのカリフォルニア州では断層運動による構造物のせん断破壊から公衆の安全を図るために、1972 年に Alquist-Priolo 特別調査地帯法（いわゆる「活断層法」）を州法として公布した。これによれば州が定めた活断層上の特別調査地帯に新規に構造物を建造する際には、その地下に活断層がないことが建築許可の条件となっている。断層がある場合は、断層線から 50 フィート（約 15 m）以内は建築が規制される<sup>5)</sup>。こうしたことを背景に、2011 年東北地方太平洋沖地震を契機に徳島県では 2013 年 4 月から活断層上の建設を規制する条例を施行した。条例では、活断層の位置がほぼ特定されている中央構造線の県内部分約 180 km のうち、断続的に確認されている同県鳴門市～三好市間の延長計 60 km について活断層から片側 20 m（全幅 40 m）を「特定活断層調査区域」と指定し、その結果区域面積は最大約 240ha に上る見込みとなる。同区域内で病院・介護福祉施設・学校・3 階建て以上で延べ床面積 1000 m<sup>2</sup> 以上のマンションなどを新築ないし改築する際、事業者は開発前に予定地で活断層の有無を調査し、県に報告しなければならないとされている。県は、専門家の助言を受けて活断層の存在を認めた場合、事業者に建物建設を避けるよう勧告できるとしている。条例に罰則はないが、従わなかった場合は事業者名を公表する。ただし小規模な建物や既存建築物は条例の適用外とし、県は関連する地元の市町と協議したうえで同区域を決定する予定であるという。こうした機械的な法の適用は、「活断層」という不確定性をもつ自然現象の規制にはなじまない面がある。事実、中央構造線（活断層系）においては有史以来大地震発生の記録があまりなく、このような長大な断層系でその理由は必ずしも明らかになっておらず、したがって将来の活動予測も不明確とならざるをえない。ゼロリスクの観点から一地方自治体が拙速にこのような一律な規制をす

ることは疑問である。すでは、1983年日本海中部地震や1995年兵庫県南部地震などを踏まえて、活断層直上の行政による土地利用規制についてその合理性に疑問が呈されている<sup>6)</sup>。また、福和伸夫・名古屋大教授(地震工学)は「活断層(注:内陸活断層)が動くのは1000年に1回のレベルで、通常海溝型の地震に比べれば発生頻度は低く、地震の規模も小さい。活断層が近くにあるから直ちに危ないと考えるのではなく、施設の重要度にあわせて、適切な対策を取ることが重要だ。」(読売新聞朝刊, 2013.3.29)と指摘してもいるが、内陸活断層を含めて陸域活断層の評価とそれに対する現実的な規制の施策(例えば、「活断層法」の制定。中田(2008)<sup>7)</sup>参照)は、まだまだ議論検討が必要不可欠な途上段階にある。

以上のように「活断層」という用語は、現状では少なくとも関連学会等の国際的合意に基づく純然たる学術用語(地質学・地理学用語)とはいえず、さらに暫定的な行政用語ともいべき側面を持っている。振り返ってみれば、わが国の近代的地質学の黎明期において、個人による恣意的な定義や外国語術語の不適切な翻訳も含めて、さらに学術語の混用や二重表記など多くの矛盾が生じた。この状況を改善すべく大正時代初期(1914)に東京地学協会(現公益社団法人東京地学協会)によって編纂出版された『英和 和英 地学辞彙』<sup>8)</sup>の序文において、当時の地質調査所長の井上禧之助が「術語の一定せざるは学術進歩の一大障礙なり、地学に関する諸書を通覧するにこの弊また尠ならず、同一の語にして意義異なるものあり、意義同じくして術語の異なるものあり往々誤解を生ぜしむ」と記した状況が、今日の「活断層」問題にも通底することは懸念される。なんとすれば「断層」については構造地質学的定義があるが、「活」についてはいわば唯一解が確定していないからである。

本論の主旨は、総括的な活断層研究のレビューや個々の活断層を対象とした論究ではない。後述するように、あいまいともいえる「活」の定義や、それに関わる「活断層」研究の問題点を検討し、その概念や現状認識を共有する一助となることを願うものである。

## 2. 活火山

地質事象における「活」の検討に際して「活断層」よりも古く議論されてきてしかもわかりやすい、いわば先行事例として「活火山」の定義の変遷をみてみよう。

明治時代において、代表的な地質学者の一人であった横山(1896)の『地質学教科書』<sup>9)</sup>では、「火山は、皆絶えず其の噴出溝よりガス、灰、焼岩等を吐出するものに非ずして、各破裂の間には全く鎮滅してその噴出溝も凝結せる焼岩に壅塞せられ毫も活動の徴を呈せざるものあり。而て時にこの鎮滅期の久しき有史時代に至り、未だ一回も破裂せず火口の如きも往々水を湛

え、湖水に変せしもの少なからず、斯る状態を呈するものを消火山 Extinct volcano (注:死火山)又は睡眠火山 Dormant volcano (注:休火山)と云う。…之に反し、噴火口内よりガス水蒸気等を発するか、又はこれに熔岩を湛え多少の活動の兆を呈するものを活火山 Active volcano と云う。」とあり、定性的な噴火活動度の違いにより形式的ではあるが「死火山・休火山」と「活火山」を区別している。

大正時代初期において、例えば横山(1913)の『陸文学講話』<sup>10)</sup>では、「火山には間断なく多少の活動を示すものと、時々活動するのみで、その間は多少鎮静して居るものがある。而も此の鎮静時期が時に甚だ長く、記録の始まって以来、現に今日まで引き続いておるものもある。因って、古来火山を二種に区別して、有史期にいたって活動したことのないものを休眠火山(一名死火山または消滅火山)と云ひ、活動したことのあるものを活動火山と云って居るが、この区別法の非学術的であることは、国によって時期にはなほだしい長短があるのみならず、又休眠火山と思はれたものも突然活動を開始することがあるによって知ることが出来る。」と説明しており、すでに「活火山」とそれ以外を区別することの非科学性を指摘している。また、井原(1914)<sup>11)</sup>では、「死火山」を歴史時代以前に活動したが有史時代には活動していないものと説明する一方で、噴火口もほとんど閉塞し、水を湛えて火口湖や火口原湖をなしているとも説明している。大正時代中期においても、例えば横山(1919)<sup>12)</sup>で「火山の中には、全く消滅して、人類の記憶の遡る限り、活動の痕跡だも示さなかつたものがある。之を消火山(注:死火山)と稱へて、現に活動して居る活火山と區別することになつてゐる。しかし此の區別は學術上全く價值のないといふのは消火山と認められた山でも俄然活動を再開することがあるからである。」と述べ、イタリヤの「ベスビウス山」を最好例としてあげている。

そもそも「有史時代」(歴史時代)という時代区分は、一般的には文字が成立し、それによる文献資料で歴史事象(本論では火山噴火や地震などの自然事象を含む)を検証することが可能な時代を指し、我が国では漠然と2,000~3,000年以内程度を指すと考えられている(それ以前は「先史時代」)。しかし文字文化の進展の度合いが国・地域によりまちまちであるため、世界統一の暦年代や絶対年代で示される学術用語とはいえない。わが国でも多くの議論があり、確定していないが、おおよそ3世紀中ごろからの「古墳時代」を日本の「先史時代」と「有史時代(歴史時代)」の境をなすとみなすのが一般的である。この意味でも「活火山」の厳密な定義は困難であり、暫定的・便宜的なものにならざるを得ないのは明らかである。

昭和時代初期においても、例えば佐藤(1928)<sup>13)</sup>では、「火山は現在の活動状態によって、活火山・休火山及び死火山の三つに區別される。しかし此の區別は、

全く便宜上のもので、その間には決して明らかな境のあるものではない。活火山は現在活動中のもので、那須山・浅間山・阿蘇山がその例である。休火山は歴史上又は口碑にその活動の事実が残されているもので、富士山・八ヶ岳などは其の例である。死火山はその活動は口碑にも伝わらず歴史にも載っていないが、地質学上火山であることは明らかなもので、大和國の二上山・下野國の男体山・上野國の妙義山などは其の例である。」とし、「死火山」「休火山」「活火山」の区別を継承しつつも、それは全く便宜上のものであることを再度指摘している。また、「活火山」を「現在噴煙し、或は熔岩を噴出しつゝある火山」と極めて限定的に定義される場合もある<sup>14)</sup>。

いずれにしても常に噴気活動があったり頻繁に噴火する火山を「活火山」、噴火記録はあるが現在は活動していない火山を「休火山」、有史以降の噴火記録のない火山を「死火山」としていた。しかし、噴火や噴気活動の間隔は火山によってまちまちであることから、「活火山」と「休火山」を分けることは難しく、科学的な論拠足りえないことから、気象庁は昭和40年代から噴火記録のある火山や活発な噴気活動がある火山をすべて「活火山」とした。例えば、昭和43年(1968)に発行された気象庁職員のための火山観測マニュアルである『火山観測指針』では、従来「休火山」とされていた富士山を「活火山」リストに掲載した。そういった中で、一般的に「死火山」と考えられていた北海道の雌阿寒岳が昭和30年(1955)に、本州の御嶽山が昭和43年(1968)から活発な噴気活動を始め、さらに後者は昭和54年(1979)に水蒸気爆発を起こしたことから、改めて「死火山」の分類区分も科学的論拠に乏しいことが一般的にも認知されるようになった。また、「休火山」とされていた秋田駒ヶ岳が昭和45年(1970)に、九州の雲仙岳が平成2年(1990)から噴火し、噴火記録の有無は当然のことながら歴史時代に人が目撃し記録したかどうかによって依拠するので、同様に厳密な科学的論拠たりえないことが改めて認識された。そこで平成3年(1991)に、活火山の定義を「過去およそ2000年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山」に変更し、噴火記録の有無ではなく地質学的な証拠に基づくものと明確化した。ところがさらにその後、2000年以上の休止期間において噴火する火山もあることが明らかとなり、国際的には1万年以内(すなわち、ほぼ第四紀完新世に相当)に噴火した火山を「活火山」とするのが主流となってきた。火山噴火予知連絡会は平成15年(2003)に「概ね過去1万年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山」を「活火山」と再定義し、気象庁もその定義を踏襲することになった。この結果、日本の「活火山」数は計110となったが、今後も火山研究の進展により「活火山」数は増減する可能性があることは自明である。さらに、上記「完新世」の定義はその前の「更新世」の最終氷期が終わり、

温暖化が始まった約1万年前から現在までを意味するが、その定義は気候変動に基づく物理化学的パラメータに基づいており、第四紀後期の火山活動史やその背景となったテクトニクスと直接関連しているわけではないことにも留意しておくべきである。また、「活火山」の範疇にある火山が、次にいつ噴火活動を発生させるかは別の問題である。さらに、原発に対する巨大噴火について新規規制基準では「①巨大火砕流が原子炉を直撃する、②直撃しなくても周辺が崩壊し原発事故に対応できない」などの場合は立地不適と判断され廃炉をせまられる状況にある。しかし、巨大噴火が起これば被害は甚大であるが、その発生確率は極めて低く、6000年～1万年に一回の事象である。現在の火山学のレベルでは、その前兆把握や直前予知はきわめて困難ないし想定不可能であり、たとえ観測網を整備しても有史以降の観測例がない場合は、予知は方法論的にも難しい。

しかし「活火山」については、「活断層」に比べて地史的にははるかに新しい事象であり、中規模噴火に関しては、過去の噴火活動の地質学的・歴史学的記録も比較的豊富である。また、ほぼ位置・場所が特定でき、事前の各種観測網の設置によって活動・前兆現象も観測しうる場合も多く、短期・直前予知の可能性も大きい。後述するように「活断層」についてはこの限りではない。

さて、火山噴火予知連絡会は、社会的影響度を評価することなく火山学的に評価された火山活動度により、Aランク・Bランク・Cランク(Aが活動度が高い)の新しい3区分の「活火山」の活動度分類(ランク分け)を決めている。このランク分けは社会的影響度を考慮しないものであるため、当然のことながら火山活動による一般社会への危険性の評価には直接結び付かない。そこで気象庁は、平成19年(2007年)12月1日から、火山活動による災害の危険性に応じ、国内すべての「活火山」について噴火警報・噴火予報を発表するようになった。同時に活動度の高い火山には5段階の噴火警戒レベルを導入し、噴火警報・予報で発表することとした。ただし噴火警戒レベルと、上記の活動度分類(ランク分け)は、直接関連するものではないことは再度留意すべきである。例えば、平成23年(2011年)1月から活発な噴火活動を始めた九州の新燃岳を含む霧島火山群は、富士山と同じBランクであった。さらに、「活火山」である北海道有珠火山の側火山として昭和18年(1943)からの2年間に17回の活発な火山活動を見せた溶岩ドームである昭和山は、かつては有珠山の麓の平地(麦畑)だったところに火山が形成されたのである。当時は太平洋戦争中であり、世間の動揺を抑えるためや軍事的観点から噴火の事実そのものも伏せられ、公的な観測すら行うことができなかった。2011年東北地方太平洋沖地震に際しても、とくに福島原発や放射能に関する情報が、政府・電力会社や地元はもちろん社会的にも十分共有さ

れなかったことは、今後さらなる厳密な検討が要される。いずれにしても、「活」についての情報共有とその伝え方や事前の対策等については、今後に大きな課題として残されているといえよう。

### 3. 活断層

翻って以上のことを本題である「活断層」について検討してみよう。これは単なる地質学史上の「温故知新」的検討ではない。「活断層」問題は、前述したように極めて重篤な社会的議論を惹起し、国民生活に多大な影響を及ぼすものであるから、その土台となる術語の共通認識を専門家のみならず政策決定者やマスコミをはじめ社会各層が持つことが無用な誤解や混乱を生まないための必須の方策であり、繰り返し社会に提示されるべきであると思うからである。

#### 3.1 「活断層」の定義とその変遷

“active fault”という用語は、アメリカにおいてカリフォルニア州の「断層図」編纂の中で、とくに地震を起こす断層として提示されたのが始まりといわれる<sup>15)</sup>。すなわち震災対策上の用語・概念としての側面が強かった。わが国では、昭和時代初期に多田(1927)<sup>16)</sup>によって「極めて近き時代迄地殻運動を繰り返した断層であり、今後も尚活動す可き可能性の大いなる断層を活断層と云ふ」と定義されたことを嚆矢とする。この定義は、基本的には現在でも変わっておらず、例えばGolssary of Geology<sup>17)</sup>でも“Active fault” “A fault on which slip has occurred recently and is likely to occur in the future. Active faults are the focus of contemporary elastic strain accumulation, seismicity, or fault creep”である。すでに指摘したように<sup>18)</sup>、この前半部は「活断層」の認定基準であり、後半が狭義の定義に相当するが、それぞれ以下に述べるように多くの問題点があり、斯界の一致をみていない。またさらに、前述した火山区分とまったく同様に「活断層」「休断層」「癒着断層(死断層)」の区分も提唱されたが<sup>19)</sup>、この区分の妥当性も当然ながら現在では極めてあいまいで疑わしいものであり、以後使うべきではない。

さて、「極めて近き時代」や“recently”とは、いつのことであろうか。当時は地質時代の最新期である新生代第四紀を指すとされてきた。約46億年の地球史に比べればおよそ200万年前(あるいは180~170万年前)以降の時代区分である第四紀は、まさに地史的には「極めて近き時代」といいえた。さらにいえば、大正時代には第三紀と第四紀の境界は、漠然と100万年前くらいとさえ考えられていた。しかるに現在においては、IUGS(国際地質科学連合)執行委員会は2009年6月30日付けで、新しい第四紀の定義を公式に批准した。これにより正式の紀/系である第四紀は、従来新第三紀鮮新世に区分されていたGela期/階

(Gelasian)を含むこととなった。従って鮮新世-第四紀更新世の境界もGelasian基底まで引き下げられ、前期更新世には従来のCalabrianに加えてGelasianが含まれることとなった。Gelasian基底は、古地磁気年代における Gauss/松山地磁気境界の約1 m上位に位置し、年代は2.588 Maとされるので、約259万年前が今後は第四紀の始まりの年代となったわけである。すなわち地史的には2.7~2.8 Maに始まる世界的な寒冷化が恒常的となった時代を意味し、かつ古地磁気等により明確に指示される層準が基底として定義されたわけである。しかしながらわが国の現状では、更新世・完新世の新しい定義に対する日本語をどのようにするか、既存の地質図類や文献類に用いられてきた凡例をどのように対比し読み替えるか、また第三紀を引き続き使用するかどうかなどが検討中である。少なくとも現在では、第四紀に活動した断層を単純に「活断層」とみなすことはなくなった。事実第四紀初期に活動し、その後活動していない断層(「第四紀断層」と呼ぶべきか?)も存在する。第四紀後期に定向的累積変位を持って複数回活動した断層を対象に再検討すべきであろう。

それでは、第四紀後期中で具体的に何万年前あるいは何十万年前以降と狭義に規定しうるものであろうか。従来から多くの案が提唱されているが、これらのほとんどは活断層の認定が断層の変位基準となる地形(例えば、海成段丘面)の形成年代に深く関わることから設定された便宜的なものであって、その曖昧さが指摘されている<sup>7)</sup>。ともあれ、1998年の「原子力安全委員会安全審査指針集」(改訂9版)では、A級活断層では1万年、B、C級活断層では5万年までさかのぼっても活動がないものは活断層の対象としないことになっていた。2006年の指針改定で8~13万年前までさかのぼることとなった。通常よく用いられてきた12~13万年前以降の活動履歴とは、最終間氷期の高温・多雨気候下で生じた広域的な海進(いわゆる「下末吉海進」)に関連して形成され、日本列島沿岸域で広く発達し、それゆえ地形的に容易に認識しうる地形面(海岸段丘面)である「下末吉面」に変位を与え、変動地形として残っているか否かに依拠している。すなわち、後期更新世の変位を基準としている。最新の国際合意では、後期更新世は(西暦2000年から数えて)12万6000年前~1万1700年前の期間である。

別の定義によれば、「現在の応力場の下で地震を起こし得る断層のうちで、断層面が地表まで達しているもの(地表断層)に限る。ただし、伏在断層であっても断層面の上端が地表近く(およそ1 km以下の深度)まで達しているものは、何らかの方法で最近の地質時代における活動を確認することができる。したがって、この種の浅部伏在断層は活断層の範疇に含める。」とされる<sup>20)</sup>。「現在の応力場」とは、日本列島周辺の4つのプレート(太平洋プレート・フィリピン海プレート・北アメリカプレート・ユーラシアプレート)

の運動方向や運動速度が有意に変化せず、したがってそれらによって惹起される日本列島および周辺海域の広域的造構応力場も大きく変化せず定常的である時代の応力場を意味する。この期間においては、活断層の活動は、定向的で累積的変位を伴って繰り返されると想定しうるからである。しかし、海域の浅部伏在断層は、物理探査を主に判定せざるをえず、その活動史が陸上の活断層ほど十分に吟味しがたい。

2013年7月の原子力規制委委員会による「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」(案)では、「後期更新世(約12~13万年前)の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降(約40万年前以降)まで遡って地形・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること」としている。中期更新世は、78万1000年前~12万6000年前とされるから約40万年前以降というのは中期更新世後期を意味することとなるが、その数値の地質学的意味は十分説明されていない。徳山(2013)<sup>21)</sup>では、「地質的には、わが国では40万年前の地層といっても、その分布はきわめて限られており、40万年前に陸上で何が起こったかを振り返るのは不可能に近く、この規定は地質学的には非現実的であると言わざるを得ない。評価の期間をいたずらに長くすることが安全につながるわけではないのである。」「中期更新世までさかのぼる」とする補完規定は日本の地質にとっては非現実的な規定なので削除すべきである。」とも述べられている。「40万年前以降」とするのは検討されるべき1つの試案ではあるが、現状においては学問的な吟味や合意はまったく不十分であり、短絡的に例えば原子力発電所立地・再稼働問題に関する活断層評価に適用するのは、現時点では恣意的かつ拙速にすぎるといえよう。

### 3.2 地震断層・震源断層・地表地震断層

従来「地震断層」という用語は、地震時に地表に現出した断層(群)を意味し、その変位事象そのものを記述認定する用語であった(例えば、大塚(1948)<sup>19)</sup>)。しかし1995年の兵庫県南部地震以降は陸域で地下深部において地震を起こした活断層(震源断層)の地表への直接的な反映である断層(地表地震断層)に限定し、二次的副次的に生じた、しかも小規模な断層は「地表地震断層」の範疇には含めない傾向にある。例えば、重力性の要因で生じた地震時の地表断層は本質的な地震活動を反映したものではなく、副次的なものであるから「地表地震断層」と称するべきでないとするものである。一例として「関東大地震」(1923)は、相模トラフ北部で生じた海溝型地震(プレート間地震)であるから、本来的な「地表地震断層」(「相模湾断層」<sup>22)</sup>)は相模トラフ沿いの海底にあって、このとき地上で出現した断層の大部分は二次的な(成因)断層とすべきである(例えば、房総半島の「延命寺断

層」)。もちろん、地表変形の全体像を知るためや災害対策上において必要な知見であるから、これらを調査しなくていいと言っているわけではなく定義を厳密に共有すべきであるということである(後述)。

地震に関して一例をあげれば、「震源」と「震央」の違いは明確にしておくべきである。最近の地震の報道において、平面図(地図)上でバツ印をもって地震の位置を示すつもりで「震源」と書き記す事例が頻出している。地震時に破壊された領域は「震源域」と呼ばれ、最初に地震波を発生した点を「震源」とするが(注:「震源」は必ずしも「震源域」中央にあるわけではない)、「震源」直上の地表に位置する点を「震央」と呼ぶ。したがってどくなることを承知で言えば、断面図でなく平面図(地図)上で「震源」を表示することはできず、「震央」とすべきである。大仰に言えば、このような地震学のイロハともいべき基本的な術語についてさえなおざりに誤表記され、マスコミを通じてその弊が一般社会に広がることは、当該記事等の信ぴょう性を疑わしめるにとどまらず、「一事が万事」で地震や活断層に対する一般読者の理解を妨げかねないので看過できない。ついでにさらなる蛇足な例を示すことをお許しいただきたい。英語で「震源」は“hypocenter”, 「震央」は“epicenter”である。『震源』<sup>23)</sup>という小説の初版ハードカバーのタイトルに“EPICENTER”と付記されていたことは、おそらく編集者の無知・誤解に基づくミスであろうが(また、小説の内容とは関係ないが)、マスコミ関係者の地震に対する理解度の低さを表す一証左でもある。「活断層」研究の成果を社会にわかりやすく説明するのは調査研究に携わる者の責務であるが、その仲立ちをするマスコミ関係者に対する不断の啓発も同様に重要であることは論を待たない。

### 3.3 活断層図編纂にみる活断層の確実度

日本列島に発達する活断層の総数は、社会の関心を惹く課題であるが、学術的に意味があるかないかを別にしてもなかなか決め難い。活断層存在の確実度やセグメント区分、副断層や二次断層をどのようにカウントするかなど未解決の課題が多い。したがって、かつて国会における審議に筆者も有識者として陪席した経験があるが、「日本に活断層は何本あるか」といった質問には簡明直截に答えようがないが、議事録には記録されるので、返答に窮した覚えがある。「一般には、1500~2000本と言われております。」とあいまいに言質をとられないような表現にせざるを得なかった。総数1310本(A級100本、B級760本、C級450本)とする見解もある<sup>20)</sup>。

さて、上述のように「活断層」そのものの定義が未確定であるとしても、社会的要請に応じて暫定的にでもその存在を確実度の観点から示す必要性から、1970年代前後から各種活断層図が編纂され凡例が提示されている。ここではそれらの経緯を追いつながりながらいくつ

の事例を比較検討してみることにする。

全国版としては、以下のとおりである。

1) **第四紀地殻変動図**<sup>24)・25)</sup>：編纂最初期の記念すべき全国版の活断層図である。白図に線で活断層を示してある(北海道を除く)。

2) **「活断層分布図とカタログ」**<sup>26)</sup>：1)の改訂版としての意義を持つ活断層図。白図に線で活断層を示してあるが、海域まで含む。

3) **『日本活断層図』**<sup>27)</sup>：基図が白図ではなく、1/200万の簡略化された地質基図に活断層の位置を示した著者も関与した全国レベルでは初めてのマップである。1)と同様に当時は、十分な現地調査・研究資料が少なかったため以下のような編集基準でまとめられた。

- ①地震断層(注：地表地震断層)：地震時に活動したことが、文書などに記録されているもの、および近年の再調査で明らかにされたもの。
- ②活断層：(a)活断層を主題とした論文・報告書などにおいて、記載事項からその存在位置と変位の向きを認めうるもの、(b)2つ以上の地質図・活断層分布図・論文などにおいて、等しく活断層と認めているもの。
- ③推定活断層：(a)活断層を主題とした論文・報告書などにおいて活断層と推定しているもの、(b)1種類の地質図・活断層分布図・論文などにおいて活断層と認めているもの、(c)航空写真の判読により作成された2つ以上の活断層分布図において、等しく推定活断層と認めているもの、(d)1種類の地質図において、第四紀層を切る断層として示されているもの。

この結果、2)と比べて「すでに何らかの形で発表されあまり異論のないものにとどめたのと、北海道を含めている点などが違う」と評された<sup>28)</sup>。さらに1)のように白図ではなく地質略図上に表示した点も異なろう。これは総括的な活断層図編纂の初期の試みとしての意義は残るし、今後途上国での予察的調査においてもこれに準じた作業基準として有効でありうるが、分類基準そのものは十分な学問的根拠に乏しい面は否めず、現時点でこれをもって活断層の存否を問う資料足りえないことに留意されたい。すなわち、本図には表記されているのに、後年作成された活断層図に記載されていない場合、意図的に削除したかのように憶測批難するのは避けるべきである。

4) **『日本の活断層一分布図と資料』**<sup>29)</sup>：複数の研究者によってクロスチェックされ、全国レベルでの初の総合的なカタログである。白図に位置を示すのみでなく、必要に応じて各断層ごとの要素や資料を付記してある。

- ①確実度Ⅰ：活断層であることが確実なもの。以下のいずれかの地形・地質の特徴を有し、位置や変位の向きが明確なことが要される。(a)数本以上にわたる尾根・谷・崖線の系統的な横ずれ(注：横

ずれ断層の場合)、(b)大局的な斜面の向きと逆向きの低(断層)崖(注：縦ずれ断層の場合。斜面の低下方向に下がる崖は、河川の側方浸食による可能性がある)、(c)時代を異にする地形群を一連の低(断層)崖が切断、(d)一続きであることが確かな地形面・地形線を切る低(断層)崖、(e)一続きの地形面上にある一連の著しいたわみ(注：撓曲崖。地下に断層がありその変位を受けた可能性)、(f)第四紀層を変位させている断層露頭(注：地すべりの可能性を吟味する必要あり。また、例えばローム層内のみを変位させている小規模な断層自体は「活断層」とは呼ぶべきではない)。

- ②確実度Ⅱ：活断層であると推定されるもの。位置・変位の向きは推定できるが①と判定するには決定的な資料に欠けるもの。例えば、尾根や谷が一本だけ横ずれを示す場合、断層崖と思われるものの両側の地形面の時代が異なる場合(注：必ずしも変位地形とは限らない)や山地などで明瞭な基準地形がない場合(注：単なる地質境界の可能性があるのである)などである。
- ③確実度Ⅲ：活断層の可能性はあるが、変位の向きが不明だったり、浸食作用による可能性があるもの。

5) **『新編日本の活断層一分布図と資料』**<sup>30)</sup>(付図Ⅰ 1/100万日本活断層図(A東北日本、B中央日本、C西南日本、付図Ⅱ 1/300万日本と周辺の活断層・地震分布図及び第四紀構造運動図)：確実度Ⅰ(確実)・Ⅱ(推定)および伏在活断層を示し、その他の活構造を含め周辺海域まで示している。

以後も、各種改訂が進められているが、基本的(定性的な)区分は同様なので割愛する。最新のデータについては、(独)産業技術総合研究所の「活断層データベース」が有用である。

広域(地域)版の活断層図も、各種編纂されているが、基本的(定性的な)区分を考える上で重要な初期の事例について若干次にあげておく。

6) **『伊豆半島活断層図』**<sup>31)</sup>：(1/5万、1/10万)

- ①確実活断層：確実に第四紀における活動が認められた断層で、次のように三分される。(a)地震断層：歴史時代の活動記録があるものや地震時の活動が明らかなもの、(b)地質学的確認：歴史記録にはないが、第四紀層を切っていて、地質学的に第四紀の活動が明らかなもの、(c)地形学的確認：(a)(b)以外で地形上非常に新しく明瞭で、ある程度の規模で連続してみられる変位地形を示し、周辺の地質状況からも第四紀における断層であると十分認められうるもの。
- ②準確実活断層：航空写真判読で活断層である確率が非常に高いと判断されるもの。このうち地表調査で断層面を認めたものを「地質学的認定」、そうでないものを「地質学的未観察」と細分した。



③推定活断層：航空写真判読で、変位の性格・方向性が確定しがたいが、それらの推定が、なおある程度可能な線状構造として明瞭な連続性がみられるもの。②と同様「地質学的認定」「地質学的未観察」を細分した。

④リニアメント：野外の直接的根拠は少ないが、かなりの連続性があり、なお活断層の可能性が残る線状構造。

1), 2) に比べ縮尺が大きくより精細に位置を示しうること、小規模な活断層もある程度表現しうること、また単なる編集ではなく現地調査や航空写真判読を加味している点で、地域的であるが活断層図の草分け的な位置を占め、その意義は高い。しかし当然のことであるが、活断層認定に当たっては当時の知見に依存せざるをえず、現時点で本図を使用する場合は最新の情報に基づく吟味が不可欠である。

#### 7) 『愛知県と周辺地域における活断層と歴史地震の分布図』<sup>32)</sup> :

①活断層：地形・地質的に確実に認定できるもの（第四紀後期以降の変形である撓曲（非対称褶曲）も含む）

②推定活断層：既存資料ではやや認定が不確実なもの。活断層末端部や断層変位地形がやや不明瞭なものを含む。

③潜在活断層：現在の地表面や沖積層において変位がほとんど認められないが、下位の更新世層に変位が確認されるもので、一般に撓曲として現れることが多い。

④潜在推定活断層：③のうち証拠がさらに不十分なもの。

⑤活断層の疑いの濃いリニアメント：リニアメント（直線状の谷や鞍部の配列などの線状構造地形）が明瞭であるが断層変位地形や活断層露頭は認められないが活断層の可能性のあるもの。

⑥活断層の疑いのあるリニアメント：⑤よりやや不鮮明だが活断層の疑いが多少残るもの。

⑦地震断層：地震時に地表で食い違いが確認されたもの。測地学的に変位がみとめられたものや地震学的に活動が認められたものを含む。

より詳細に確実度を細分しようという意図は評価されるが、作業基準とはいえ各区分は定性的であいまいさが残り、研究者によって異なる「確実度」となる懸念がある。複数の研究者によってクロスチェックされ、①～③に集約されていくべきものであろう。

このほか、『長野県の活断層—活断層分布図と資料—』<sup>33)</sup>、『九州の活構造』<sup>34)</sup>や『近畿の活断層』<sup>35)</sup>その他があるが、定性的な区分は基本的に同様なので割愛する。また、地質調査所（現「(独)産業技術総合研究所 地質調査総合センター」）による地質図を基図とした1/20万、1/50万活断層図も出版されている。特に、後者は全国同一基準をめざして体系的に記述・編集を進めている。また特定のタイプの活断層について

は、『第四紀逆断層アトラス』<sup>36)</sup>も出版されている。

以上の小縮尺ないし広域の活断層図類や災害図（場合によっては全世界版）は、個々の活断層評価そのものより、広範な当該地域の活断層の総括的なレビューにはきわめて有効である。

1990年代になると、活断層ストリップマップなどのより大縮尺（1万分の1あるいはそれ以上の大縮尺）で詳細な活断層図の編纂が試みられてきた。これは活断層に関する情報が精細化され、蓄積されてきたことにより防災対策・土地利用などに資する実用的・応用的な社会要請（地震防災上の土地利用の適正化）が高まったことによる<sup>37)</sup>。

例えば、九州における活断層ストリップマップの試作に際して、断層線の表現は、確実度Iの断層のみに限定している。なぜならば大縮尺の地形図を用いれば非常に小さい誤差で表現しうるので不確定な要素をできるだけ排除するためである。その位置表現をAccurate（確実）、Approximate（推定）、Concealed（潜在）に3区分しそれぞれ実線、破線及び点線で示している。また、断層線にケバで縦ずれ断層の落ちの方向、ポールで横ずれ断層の落ちの方向、矢印で横ずれ断層の横ずれの方向を示している<sup>38)</sup>。

宮城県仙台平野西縁の活断層詳細図の凡例を検討する際に縮尺別の活断層の表現精度とその内容の関係がまとめられている。数千分の1程度の大縮尺では、図上で線幅0.1mm～1.0mmで実際の0.1mm～1.0mmを表現できるので、断層露頭の詳細位置とその形態（走向傾斜など）、変動崖・凹地・凸地など個々の変動地形の微地形や、地震断層（地割れなど）の分布、断層発掘、個々の住宅・施設・道路などの土地利用が表される<sup>39)</sup>。

北上低地西縁の活断層詳細図を検討する際、いわゆる確実活断層に限定し確実な断層変位地形が認められる部分は実線で表示された。さらにより正確な位置を示せる部分は実直線（滑らかな曲線）で、やや精度の落ちる場合は実ナミ線で表示された。なぜなら、断層線は一般に低断層崖や撓曲崖の基部に引くが、比高の小さい撓曲崖の場合には明瞭な低断層崖が認められる場合と比較して正確な断層の位置を示しにくいからである<sup>40)</sup>。

神奈川県三浦半島の活断層詳細図の試作を検討する際に、確実断層（空中写真によって、断層線が確認できる）は0.5mm幅の実線で記入し、断層線の位置の誤差は1万分の1縮尺では5mとなるが、実際には最大誤差は20mに達する場合もあることが指摘されている<sup>41)</sup>。

さらに、長野県諏訪盆地の活断層詳細図を検討する際、いわゆる確実活断層（段丘や山地斜面などの地形面を明瞭に変位させ、変位方向なども明瞭）を0.6mm幅の実線で記入し、これは実際には6mの幅に相当するが、部分的に崖錐を発達させているところや山地斜面を切る断層などはおおむね6mの2倍程度の誤差



を見込んでいる。本来位置が明瞭だが、部分的に人工改変によって不明瞭となっている場合にその不明瞭区間が狭ければ、明瞭な断層線をつなげることでその位置をかなり正確に決めうる（人工改変以前の古い空中写真による判定）として0.6 mm幅の一点鎖線で区別して表示した。またこの場合の位置の誤差は6 mの2～3倍程度と見込んだ。いわゆる伏在活断層（位置が正確にわかる断層が部分的により新しい堆積物によって覆われたり、谷の発達で断層地形が消え去ってしまったもの）の場合は、0.6 mm幅の点線で表示した。とくに断層面に傾斜がある場合には位置の誤差は6 mの5倍程度まである可能性を示唆した。さらに、ボーリング資料から推定される活断層は、位置を特定しにくいので、位置の誤差が約±50 m以内のものを●で、それ以上のものを○で表示した。このような地下の潜在断層を誤差が約±50 mを基準に区別することの妥当性や、不確実な断層の表示の可否は今後検討を要すると指摘している。また、いわゆる推定活断層（断層変位地形がやや不鮮明で活断層であることの実度が上記のものより低いもの）を破線で表した<sup>42)</sup>。

さらに、1996年以降に活断層やその認定に関わる地形面および地すべりなどの分布を1/25000地形図上に示した『都市圏活断層図』が国土地理院から刊行されている。2005年度終了予定であったが、地方都市や山地地域を含めた主要活断層帯も対象とする計画に移行した。

例えば、2000年代になると、「都市圏活断層図 阿寺断層とその周辺」<sup>43)</sup>、「都市圏活断層図 庄内平野東縁断層帯とその周辺」<sup>44)</sup>「都市圏活断層図 境峠-神谷断層帯とその周辺」<sup>45)</sup>などが解説書とともに出版されている。都市圏においては被覆層が削剥されたり、人工的に擾乱されている場合、活断層調査は極めて困難であり、こうした既出版の大縮尺活断層図でも、その後の調査研究による新知見によって修正を要される場合もあり、電子媒体出版によって改版が容易に行われるべきである。

独立行政法人 産業技術総合研究所地質調査総合センター（旧地質調査所）の活断層研究センター（現地震活断層研究センター）を中心に、いくつかの重要活断層（系）についていわゆるストリップマップ（短冊図）が刊行されている。縮尺1/1万～1/2.5万～1/10万で、地質基図上に断層や活動性評価の基準となる変位地形や露頭なども表現されているが、やはりその後の調査研究による新知見によって修正を要される場合もある。また、同地質調査総合センターによる近年刊行の地域地質研究報告の1/5万地質図幅でも、当該地域の活構造の記載や記述が多くなってきたが、個々の図幅の特性もあり統一性は必ずしも十分とはいえない面がある。

より詳細な1/1万程度の活断層図やそれに基づく地震時の変位量予測図刊行の重要性が指摘され<sup>46)</sup>、一般の人々（とくに当該地域住民や地方自治体防災担当者

等）に活断層が存在することを知らせるべきであることは言うまでもない。反面、その影響は大きいから、例えば活断層図類の刊行によって当該する土地の値段が下落した場合などに不動産業者等からの訴訟問題になった場合の対応（国や公的機関のオーソライズ）は、検討されるべき課題である。

### 3.4 活断層の活動度と危険度

#### 3.4.1 活断層の活動度（活動性）

活動度が高いにもかかわらず再来周期を上回って長期間活動していない活断層の危険性は定性的には明らかであるが、おのおのの活断層の危険性が具体的にどの程度切迫したものか、現状の研究レベルや方法論では精密に決めえない。

例えば、中央構造線は、地質学的には関東地方から近畿・四国を経て九州まで延びる日本有数の大断層で、このうち近畿半島奈良県南部以西の約360 kmは活断層帯とみなされている。エリア別に6区間に分ける試みがなされ、徳島県は「讃岐山脈南縁～石鎚山脈北縁東部区間」に相当し、1596年の慶長伏見地震を最後に活動していないことを論拠に、国の地震調査研究推進本部の長期評価では地震の発生確率は30年以内がほぼ0～0.3%、100年以内がほぼ0～2%とされるが、実用的な評価レベルとはいえない。

また、活動度の低い活断層においてはさらに困難さが増す。わが国の内陸のCクラスないしそれ以下の活断層の活動周期、すなわちそれらによる地震の再来周期（時間間隔）が1000年～10000年程度であるのに対して、近代的な地震計による地震観測の歴史は100年程度以下でしかない。精度が著しく劣る歴史記録や地質記録で補足しても、補完は本質的に不十分である。また、このレベルでは本来、周期性がないかもしれないし、開析された死火山のようにすでに活動が終了してしまった可能性もありうる。例えば、北上低地西縁活断層群の調査結果で「M断層は、第四紀断層ではあるが、最近の10万年間程度は活動していない断層である。断層の活動周期が10万年を越えることはない、とは断定できないが、近年の日本におけるトレンチ調査の結果からみると、これほど長い活動周期を持つ活断層は想定しにくい。活断層を、これからも活動して地震を引き起こす断層と定義するならば、M断層が活断層である可能性は小さい。」と述べているが<sup>40)</sup>、他の断層も含めて国内外の関連学界レベルで合意を得るべく、今後事例を積み重ね吟味していく段階であろう。

#### 3.4.2 活断層の危険度

1995年の兵庫県南部地震を惹き起こした六甲断層系に属する野島断層による地震の発生確率は、当時30年以内で8%とするものであった。発生確率が高いことは一般に次期の活動の切迫度が高いことを意味するが、当該断層そのものの危険度評価には不十分であ

る。従来、定性的ではあるが切迫度（危険度）を示す指標としては、「地震後経過率」が用いられてきた。これは、最新活動時からの経過時間  $t$  と平均的な活動間隔（再来周期） $R$  の比を用い、 $t/R$  が 1 より大きければ危険度大として「要注意活断層」とするものである。いうまでもないが、あくまで暫定的な目安にすぎない。

特に、地震計観測記録や歴史記録を越えて活動周期が長い場合、地震のたびにほぼ同じ大きさの食い違いが生ずると仮定する「固有地震モデル」が適切であるか否か検討の余地が大きい。なぜなら、ある活断層が単独で地震を発生させた場合と、近接する活断層と連動してさらに大きな地震を発生させた場合で、その断層のずれの量が大きく変化するか否かさえ、詳細には不明だからである（後述）。したがって、「活火山」について噴火警報・噴火予報を発表するのに準じた「活断層」の活動警報・予報を出せる段階には当面ないといえよう。繰り返しになるが、活断層は、岩石・地殻の破壊現象という観点からは共通性を持つが、一方、（特に大規模な）活断層においてはその背景をなす広域応力場を含む造構場や造構過程など（Tectonic Setting）において固有性を持つ。したがって「近い将来の活動」を普遍的かつ決定論的に予測することは現状では不可能に近い。こうした学術レベルであることは留意すべきである。

3.4.3 活断層による被害危険地域

活断層の変位活動そのもの、あるいは地震発生に伴う地表部の揺れによる地震被害は様ではない。多くのシミュレーションが行われ地震災害軽減に役立つことが期待されるが、ここでは以下に構造地質学的観点からいくつかの断層のタイプによる被害の不均一性を指摘するにとどめる。

**逆断層**：上盤側（とくに地表部）は、凸部（バルジ）を呈し、地層の変状（主断層に大略並走する正断層ないし正断層センスの地割れや開口裂罅など）の集中や地下に延びるアンチセティックな副断層（主断層の一般傾斜と反対に傾斜した副断層。この場合は逆断層）及びシンセティックな副断層（主断層と同じ向きに傾斜した副断層。この場合も逆断層）の発達はありうるが、下盤側にはない（少なくとも知られていない。筆者の浅学かもしれないが）。地震断層の事例としては、陸羽地震（1896, M7.2）における千屋断層が挙げられる（例えば、<sup>47)</sup>、<sup>48)</sup>）。地質断面における逆活断層の事例としては、能代衝上断層群<sup>49)</sup>があるが、基本的に前述例と同様である（図-2）。揺れの大きさも上盤側に比して、下盤側は著しく小さくしたがって地震被害も顕著に少ないのが一般である。もちろん下盤側に厚い軟弱な堆積物が分布する場合に、揺れの増幅や液状化などによって被害が増大する可能性はある。

**横ずれ断層**：直上に建築物等があれば断層変位を受けてずれることは明らかである。一例をあげれば、昭

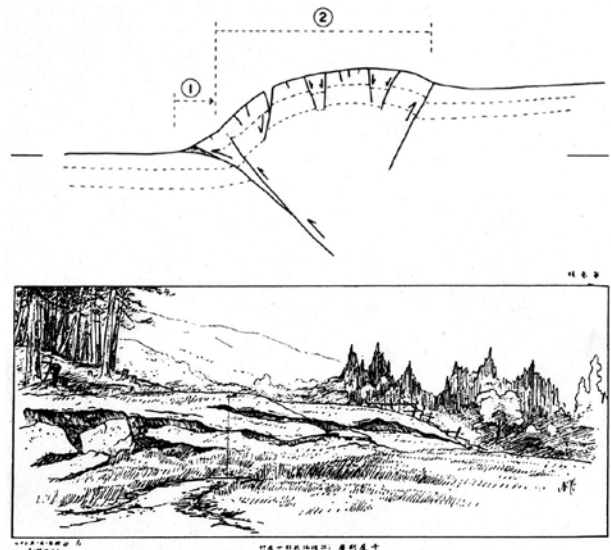


図-1 千屋断層（逆断層）の模式図<sup>48)</sup>とスケッチ<sup>47)</sup>  
Fig.1 Schematic view and sketch of Senya fault.

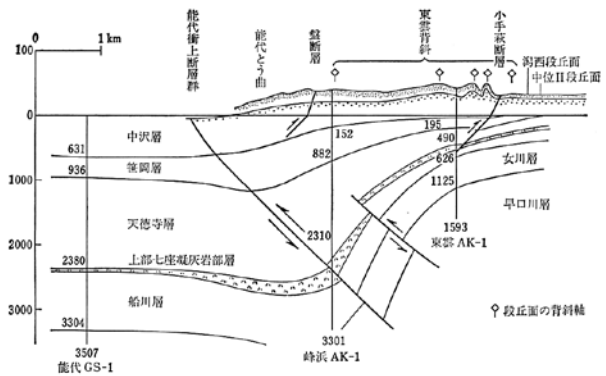


図-2 能代衝上断層群の地質断面図<sup>49)</sup>  
Fig.2 Geological cross section across Noshiro thrust faults.

和5年（1930）の北伊豆地震（M7.3）時に、北伊豆断層系の丹那断層の活動によって当時工事中であった東海道線丹那トンネル南側第3水平坑が切断変位させられたことは有名である。さらに横ずれ断層では、主断層周辺で二次断層・三次断層の発達や引きずり褶曲の発達がありうるが、それらを生ずる応力条件は想定できるが実際に変形が生ずるかは断層周辺の岩盤の破壊・変形条件を満足しているかによる。北アメリカのサンアンドレアス断層（右横ずれ）の一部セグメントに沿って、それに低角で斜交する複数の背斜構造が発達する事例が知られているが<sup>18)</sup>、<sup>50)</sup>、本来、主断層をはさんだ両ブロックの応力状態は等価であるはずだが、断層北東側にのみ発達する理由は、その地質条件に依拠する岩盤の破壊・変形条件と考えられるが、定量的に十分に明らかではない。

**逆断層成分を持つ横ずれ断層**：一般に横ずれ断層は、縦ずれ成分を伴うことも多く、長大な断層では、縦ずれ成分の変位量やセンスも様でない場合がある。縦ずれ成分と横ずれ成分の大きさが拮抗するような場合は、基本的に変状は上盤側に集中することは、

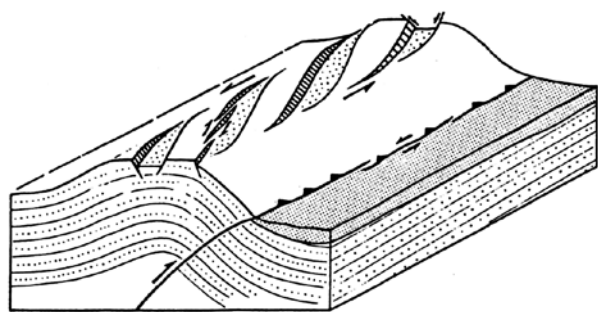


図-3 1980 El Asnam earthquake (M7.3, Algeria) 断層の模式図<sup>51)</sup>  
Fig. 3 Schematic view of the deformed structures by 1980 El Asnam earthquake.

逆断層の事例と同様であるが、その様相は異なる。図-3に示すように上盤に生ずる正断層ないし引っ張り破断は雁行配列を示す<sup>51)</sup>。同様な事例は、ペルー中部の Paviahuanca 地震 (1969) の地表地震断層でも知られている<sup>52)</sup>。

### 3.5 活断層の生成・発達・終焉過程

すべての事象には、始まりがあり終わりがある以上、活断層も例外ではない。既存断層が知られていない箇所に新たに発生した断層を「初生断層」と称することにする。従来知られていない新たな(地表)地震断層の出現も報告されるようになった。一方で、鳥取県西部地震(2000, Mw 6.6)や新潟県中越地震(2004, Mw 6.3)などのように活断層地形の形成・成長にほとんど貢献しないようなごく小規模な地表地震断層しか伴わない被害地震も発生し、問題を複雑化させている。

ともあれ、その後、本断層が一回限りで終止するか、繰り返し活動するとしても地質断層に見られるようにいつか断層運動が終息するか、現在の研究レベルでは定かではない。例えば、「成長断層 growth fault」と称されてきたものは、断層が長期間にわたって発達したために断層の両側の堆積作用を規制するため、断層の両側で同層準の地層の層厚や岩質が異なるものである。すなわち一種の堆積時造構運動によって累積的に形成される断層である<sup>53)</sup>。第四紀堆積盆を画する活断層においては成因を論ずる場合に考慮されるべきである。逆に、一連の造構運動の終結に伴って終止した断層が、新たな広域造構応力場の転換に対応していわば「若返り」活動を生ずる場合もありうる。前述した火山活動分類と同様に「活」の定義は依然吟味検討がされるべき課題である。以下、やや統一性を欠くが、いわば活断層プロセスにおける個別課題を列挙して問題点を示唆する。

#### 3.5.1 活断層の活動開始時期と地域性

活断層資料の全国的な蓄積が進んだことを受けて、活断層活動開始時期を推定する試みがなされるようになった。開始時期推定の手法として、①活動開始層準

認定による手法と、②総変位量及び平均変位速度に基づく計算による手法が挙げられている。いずれにしても変位基準の変位開始が活断層の活動開始を示すことを前提としている。

中国地方と中部地方の活断層の平均変位速度値  $S$  と第四紀変位量  $Dq$  を用いてその断層の活動開始時期  $T$  を検討し、 $T$  (百万年) =  $Dq$  (km) /  $S$  (mm/年) によって求めた例がある。 $T$  は、第四紀後期の平均変位速度をそれ以前に外挿した時、時間とともに増加する変位量が第四紀変位量  $Dq$  に達するのに要する時間に相当する。この結果はほぼ  $T = 10^6$  年となり、両地方の活断層の断層長や破碎帯幅などに顕著な地域性が見られるものの、活動開始時期において顕著な差はなく、いずれも 1 Ma 程度であることを示した<sup>54)</sup>。これはすなわち前期更新世後期の Calabrian (180 万 6000 年前 ~ 78 万 1000 年前) の後期に相当する。

次に他の例<sup>55)</sup>を検討してみよう。信頼性が高いとされる I-1 タイプ断層(活断層を含む)の両側で同層準の地層の層厚が異なっており、それより下位の層準の地層の層厚が同じ場合には、層厚が異なる地層の年代を断層活動開始時期とみなす。これは一種の堆積時造構運動であって地質学的には上述した成長断層(growth fault)と称される断層に相当する。こうした地層の層厚が異なる原因には、他にも、①断層運動またはそれ以前の変形の過程で、地層の一部が流動または変形を起こしたと考えられるもの、②岩質または層厚の変わり目を選んで断層が発生したと考えられるもの: この場合層厚が異なる地層の堆積より後に断層運動が生じた可能性がある<sup>53)</sup>などがある。さらに厚い層厚を示す地層側が沈降(堆積)中心に近いことになるが、長野盆地北西縁や新潟県の六日町断層他、堆積時の沈降側が活断層活動期では隆起側になる、いわゆる運動(センス)の逆転がみられる場合もある。しかし、これらは堆積盆を規制する規模の広域な断層活動に適用されるべきで、露頭規模で論じられるべきものではない(もちろん、露頭規模の断層面で逆転の証左を発見すること自体は必須であるが、その解釈に際して総合的な地質学的検討を要するという意味である)。

その他、平均変位速度が一定であるという仮定が妥当であるか否か検証しがたいし、総変位量の推定に不整合面を用いるのは厳密には不適切であり、山の高度を用いるのも削剥量を正確に復元できなければ同様に不適切であるから、結果の吟味が必須である。

さて、活断層の長期的活動予測に際して、地域的特性、少なくともその大局的な傾向を把握しておくことは重要で、「木を見て森を見ない」式の議論を避けることができる。以下に既存の見解を要約する。

**日本列島全体:** 大部分の活断層が 3 Ma 以降に現行の活動を開始し、それ以降は、2 ~ 1.5 Ma の間に活動を開始した活断層の数に小さなピークが存在し、1.5 Ma 以降には大幅な増加が認められ、0.5 Ma 前後に最大となるが、それ以降に活動を開始した活断層の

数は減少する。

**東北日本**: 逆断層が卓越する。N-S 性の逆断層は 3.5 Ma 頃から現在にかけて活動を開始 (1.0 Ma 以降に活動したものも含む) する。NE-SW 性の逆断層は、1.5 Ma 以降に活動開始し、特に 1.0 Ma 以降に集中する。

**中部日本**: 糸魚川—静岡構造線以西の内陸部は横ずれ断層 (共役関係をなす NE-SW 性の右横ずれ断層と NW-SE 性の左横ずれ断層) が卓越し、沿岸域と内陸部南側に逆断層 (NE-SW 性と N-S ~ NNW-SSE 性) が分布する。2.0 ~ 1.5 Ma の活動開始時期が他地域に比べ多い。横ずれ断層は 2.0 ~ 1.5 Ma に比較的多くの活動開始時期が集中する。NE-SW 性の逆断層は約 1.0 Ma 以降に集中する。

**西南日本**: 近畿三角帯以西では、逆断層 (N-S 性 ~ NE-SW 性) と横ずれ断層 (NE-SW 性及び E-W 性の右横ずれ断層と NW-SE 性の左横ずれ断層) が混在する。1.5 Ma 頃から活動を開始した活断層に占める横ずれ断層の割合が増加する。逆断層は、近畿三角帯南東側では比較的早く (おもに 5.3 Ma 以降)、北西側では若い傾向がある (おもに 1.8 Ma 以降)。横ずれ断層では、おもに 1.8 Ma 以降 0.2 Ma である。

**伊豆半島周辺及び関東地方** (伊豆半島周辺: 伊豆半島を含み東を神縄・国府津—松田断層帯、西を富士川河口断層帯に画される地域、関東地方: 関東平野・関東山地を含み西を神縄・国府津—松田断層帯の延長及び糸静線で画される地域): 伊豆半島主部は横ずれ断層が発達し、縁辺部では逆断層が分布する。関東地方では、NW-SE 性の逆断層ないし横ずれ断層が発達し、いずれも概して若く 0.5 Ma 以降である。

**九州地域**: NW-SE 性の左横ずれ断層、NE-SW 性の右横ずれ断層及び E-W 性の正断層が発達する。データが不十分である。

**活断層の破碎幅**: 活断層の破碎幅が第四紀を通じて周期的に定向的に累積したこと及び、第四紀を通じて一様反復性が成り立つと仮定して、現在から遡って時間経過に伴う累積破碎幅を検討し、 $\gamma$  線測定を用いて段丘及び更新世後期の堆積物を対象とした活断層の破碎幅 FW (m) と断層変位を受けた最新の地層年代 T (万年) の間に  $FW = a \cdot T$  ( $a$ : 平均破碎幅拡張速度 (m/万年) という一次式関係があるとした例がある<sup>56), 57), 58), 59)</sup>。例えば、福岡県福岡市を北北西—南南東に縦断する長さ約 15 km の西側隆起の警固断層では、白亜紀花崗岩の破碎幅は約 32 m、古第三紀始新世の砂岩では約 27 m、第四紀更新世後期 (約 9 万年前) の火山灰堆積物では 0.9 m であることが示されている。さらに、破碎幅から断層長ひいては活動性や地震規模の推定まで試みられている。繰り返される断層運動によって、断層面の断層破碎幅が増加していくとする作業仮説は十分魅力的であるが、その実証は難しい。いわば断層破碎幅の増加率は、破碎される岩石・地層の物性や断層運動のパターン、断層面を境にして

異なる岩質が接する場合の破碎帯の挙動、断層破碎帯を構成する断層粘土や断層角礫などの断層破碎物を一括して良いかなど、破碎帯での変形様式は、このように埋没深度 (封圧) の大小により特徴的な様式があり、それらが階層的に変化する<sup>21)</sup> 等々影響する未知の要素が多く、容易に定量化 (数式化) できにくい。いずれにしても現状ではデータを増やして検討を進めるべきである。

さらに、破碎帯に階級値を導入し、破碎幅 FW と断層数に以下のべき乗数関係式があることが提示された<sup>57), 58), 59)</sup>。すなわち  $N = 150 \cdot W^{-1.73}$ ,  $W = (FW + 1) / 3$  である<sup>61)</sup>。そしてその累積破碎幅に対応する断層数 (N) を過去 200 万年間に関して活動度ごとに調べた。その結果、C 級活断層の出現は 200 万年前 (第四紀初期)、B 級活断層の出現は 70 万年前 (中期更新世)、A 級活断層出現は 20 万年前と推定された。さらに、10 万年ごとの断層増加数 (増加率) を算出し、 $2(150 \sim 100 \text{ 万年前}) < 4(100 \sim 70 \text{ 万年前}) < 11(70 \sim 50 \text{ 万年前}) < 30(50 \sim 30 \text{ 万年前}) < 146(30 \sim 10 \text{ 万年前})$  であることが示され、中期更新世以降に地殻変動が顕著になること及び断層増加率が変化する時点 (100 万年・70 万年・50 万年・30 万年前) は地域で異なる第四紀での変動開始時期とも整合することが示唆された。

中国地方の横ずれ活断層 (主に第三紀に顕著な変位増加) と中部地方の横ずれ活断層 (主に第四紀に顕著な変位増加) との比較から、①破碎帯幅は中部地方で大きく (数 10 m 以上)、中国地方で小さい (10 m 以下)、②破碎帯幅は第四紀変位量と比例しており、したがって現在の破碎帯は第四紀に生じた、③破碎帯幅 W は断層長 L と対応し、中部地方の長さに対する破碎帯幅の比  $W/L$  は中国地方のそれは中部地方のそれより小さいなどの地域性が見られることも示された<sup>54)</sup>。

活断層の発生は、既存断層のない個所に新たに発生する場合と既存断層を利用して発生する場合 (いわゆる「断層の若返り」) があるが、地質学的にその活動史の変遷を吟味する必要がある。例えば、中国地方では白亜紀後第四紀前のある時期に横ずれの向きが逆転したこと、すなわち地殻応力場がほぼ南北圧縮場からほぼ東西圧縮場に変化) などが想定される。また、活断層の変位様式 (縦ずれか横ずれか) や、特に大規模な活断層では堆積盆形成など他の地質事象との関連や地体構造区分との関連 (地域性) など、個々に検討されるべき地域地質課題があり、他地域 (東日本ほか) や外国の事例も含めて今後さらなる吟味が望まれる。

### 3.5.2 活断層の成熟度

1974 年伊豆半島沖地震 (M6.9) の地表地震断層である石廊崎中央断層 (主断層) 及び石廊崎北断層・石廊崎南断層 (副断層) の観察結果<sup>62)</sup> に基づいて、この断層系の累積変位は 300 m に達するのに変位の大部分は 1 つの断層面で繰り返し成長する主断層帯の発達

が十分でない(変位分散型の未成熟な断層帯)ことが改めて指摘された<sup>63)</sup>。一方すでに、中部地方の赤石裂線に並行する光明断層の発達過程を、I. 撓曲段階、II. 小断層形成、III. 小断層の生長と主断層の発生、IV. 小断層の衰退と主断層への変位の集中の4段階に分けられるとした例もあり、1964年以降の長野県の松代群発地震に適用するとII~IIIの段階、1964年岐阜県中部地震はIIIの段階、1966年のParkfield-Cholame地震はIVの段階にあると述べられた<sup>64)</sup>。これを支持し、地震の発生様式に対応する断層の発達過程をmaturity(成熟度)という用語で表すことが提唱されたが<sup>65)</sup>、事例も少なく定量的な表現には至らず、またあまりにも構造地質学的な研究課題であり当該研究分野以外の理解や関心をあまり惹かなかつた。

その後、2000年鳥取県西部地震においても、左ずれ活断層リニアメントや地表地震断層の発達は悪く、震央域では未成熟な断層が並列的に表れ、その一部が地表に達したこと、言い換えれば震源域においても主断層が未形成で変位分散型の断層かもしれないという考えが提示された<sup>66)・67)</sup>。また、これも含めて山陰地方の活断層・地震断層は、地形地質的特性からみて活断層の発達過程としては初期ないし未成熟な段階にあると指摘された<sup>68)</sup>。一方、地殻内大地震のデータから地震規模(Ms, Mw)、震源断層長L、活動間隔 $\tau$ の関係を調べ、Lが同じでも $\tau$ が長いほど地震規模や平均応力降下量が多い傾向があることが示唆された<sup>69)</sup>。また、アメリカ・カリフォルニア(サンアンドレアス断層)やトルコ(北アナトリア断層)のプレート境界をなす大規模横ずれ活断層について、断層の形態的複雑度(ステップ密度)が累積変位量(成熟度)の増加とともに減少することが示され、これは地質構造の進化(stuctural evolution)、(注:断層の進化)に対応して地震活動も進化することであるとして、片方の発達段階を示す指標から他方の発達段階を察知できるとも考えられた<sup>70)</sup>。「以上の2論文は、活断層の地質学的調査結果が、そこで起こる地震のより正確な評価に結びつく例として、松田時彦氏によっていち早く紹介され、その意義が強調された。」<sup>63)</sup>と指摘されている。それ以降も上述の断層/地震活動の進化-成熟過程に対応して変化する活断層や地震のパラメーターが数多く提出されている(たとえば、<sup>71)</sup>)。その結果、成熟度の低いすなわち累積変位量や変位速度が小さく、活動間隔(再来周期)が大きい活断層では、比較的短い断層から大規模な地震が生じることが知られてきた。日本の内陸被害地震活動変化の指標に断層成熟度を考慮する試みもなされてきた(例えば、<sup>72)</sup>)。また、M6以上の地震(断層)のslipや長さを検討し、大きな応力降下の可変性(variability)を示唆し、個々の断層セグメント上の応力降下は大まかにはコンスタント(3.5~9 MPa)であるが、成熟度(structural maturity)の高い断層は成熟度の低い断層よりも応力降下が小さく、またそれにも地域性があることなども

指摘された<sup>73)</sup>。

今後は、より多くの事例の蓄積によるそれらのパラメータの精度向上や断層破砕物・破砕帯幅等の研究とそれらを踏まえた成熟度のより定量的な表現が望まれる。なお、以上の成熟度の議論は横ずれ断層に限定されるものではないが、縦ずれ断層に関しては既存の知見はさらに少ないのでここでは割愛する。

### 3.5.3 活断層の終焉

活断層も将来的に活動を終えるだろうが、そのありようは詳らかではない。ここでは、地質断層(第四紀断層)の一例を挙げるに留める。

長野県下を縦走する糸魚川-静岡構造線に大略並走し、松本盆地東側の中山山地を南北に縦走する中山断層は、いわゆる全長60 kmに達する「小谷-塩尻線」<sup>74)</sup>の一部をなす。東から西への高角衝上運動が推定されている。本断層を境に中山山地東側に中新世の海成碎屑堆積岩類が分布し、西側に鮮新世~更新世の溶結凝灰岩を挟む陸成の碎屑堆積岩類からなる大峰類層が分布する。北部フォッサマグナ地域(長野県側)における更新世中期を最盛期とする「大峯変動」<sup>75)</sup>による隆起塊に広く残存する大峯面群と称される高位小起伏面は、鮮新世~更新世初頭(既述のように第四紀~第三紀境界に関する現在の知見では、「更新世初頭」と解される)の猿丸期変動によって形成された地質構造(例えば中山断層)を切る原初準平原である。すなわち、大峯面群は、ほぼ海水準に近い状態で形成され、その後現在見られるように700~1,000 mも隆起したことになる。そして中山断層は、大峯面を変位させていない。したがって、このようにいわば造構的隔離が有意に大きいので構造発達史的に見れば、中山断層は広義の第四紀断層に属するとしても、後期更新世以降の活動は見られず活断層ではなく、その断層運動は更新世初期に終焉しているとみなせる<sup>76)</sup>。後期更新世に活動した活断層がどのように終焉するか一般的には明らかではないが、断層運動の終焉事例の吟味が一層なされるべきであろう。

もう一つの重要課題が、一部前述したような「断層の若返り」である。プレート運動の変化による長大な地質学的過程での広域造構応力場の変化によって、既存断層の変位様式が変わり活断層として新たな活動を生ずることである。例えば、アジア地域の(大規模)変形は現在と50 Ma以前とで異なり、インドシナ(Indochina)と南中国(South China)を画する主要な地質学的不連続であるRed River断層帯(ベトナム)は南シナ海(East Vietnam Sea, South China Sea)の開口(前期中新世)に際して左横ずれ運動で寄与している。一方、現在では強い右横ずれ運動を生じている<sup>77)</sup>。この他、イランのザグロス断層ははじめ各地にあるが、いずれも長さ数100~1000 km以上の大規模断層である点に留意すべきである。

### 3.6 活断層セグメントの連動破壊

活断層は、巨視的には1本の線状構造で近似的に表現されることが多いが、一般には断続的に、また並走・分岐する複数の活断層セグメント群から構成される。地震時に、個々のセグメントが個別に活動するのか、または連動して活動してより大規模な地震を発生するのかが難しく、未解決の課題である。すなわち1つの(大)地震で動く範囲を起震断層(系)のセグメントとしているが、その合理的認定は難しい<sup>78)~83)</sup>。過去の事例からさらに多くの地震像を求める調査・研究が必要であることがすでに指摘されている(例えば大沢他(1984)<sup>46)</sup>)。次に主に産業技術総合研究所(2006)『きちんとわかる巨大地震』<sup>84)</sup>を要約する形でいくつかの事例を紹介するにとどめる。

わが国の内陸地震としては最大級の**濃尾地震**(1891, M 8.0, Mw 7.4)の地表地震断層では上下に5 m ずれた水鳥断層崖が世界的に有名だが、全体として断層変位の大部分は左横ずれが卓越し最大8 mに達し、全長80 kmに及び地表地震断層を生じた。これは既知の活断層系のうち、温見(ぬくみ)・根尾谷・梅原断層などの断層セグメントが連動した結果による。トレンチ調査結果からは、各断層セグメントは過去に個別に活動しており(例えば、梅原断層の再来周期は約2万年)、濃尾地震時のように連動して活動した事例は極めてまれである。このような複数の活断層セグメントの連動事例としては、いまだ確実とはいえないが、1586天正地震(M 7.7~7.9)<sup>83)</sup>・1596慶長伏見地震(M 7.25~7.75)・1662寛文近江若狭地震(M 7.25~7.6)などがあげられる。

外国の事例としては、アメリカの**ランダース地震**(1992, Mw 7.3)が有名である。これは、北アメリカプレートと太平洋プレートの境界をなすトランスフォーム断層であるサンアンドレアス断層の東方に併走する東カリフォルニアせん断帯に位置するジョンソンバレー・ホームステッドバレー・エマーソン断層セグメントの連動により、総延長85 kmに達する(右横ずれ)地表地震断層が生じたものである。各断層セグメントは過去に個別に活動しており、独立に断層が活動すると、最大想定地震はM 6.8と推定されるが、ランダース地震のように一緒に活動した事例は極めてまれである。

また、インド・オーストラリアプレートとユーラシアプレートが衝突しているヒマラヤ大衝突帯の西端付近で発生した**パキスタン地震**(2005年, Mw 7.6)は、総延長約70 kmの地表地震断層を生じた。全体的に北東側が南西側にのし上げる逆断層で、上下ずれは最大約7 mに達した。これは、ステップもしくは屈曲によって大きく北部・中部・南部の3つのセグメントに分けられる。中部は、タング断層として知られていたが他は不明だった。北部については、その後の調査で活断層地形が存在することが指摘された。各セグメントの過去の活動歴の詳細は不明だが、別々に活動し

ていた可能性は否定できない。今回の地震においては3つの断層セグメントの連動可能性が指摘されている(例え<sup>84)</sup>)。

上述のように少ない事例ではあるが、蓄積される地震エネルギーはせいぜい近傍の3つのセグメント内に限られるのか、あるいは偶然の一致にしか過ぎないのだろうか。こうした活断層セグメントの連動についての従来の見解は、幾何学的な配置に依拠したもので、「一定の距離以上に離れていれば2つの活断層は別々に動き、以内であれば連動する。」というものである。従来「一定の距離」を5 kmとする場合が多いが、その根拠は必ずしも明確ではない。

上述の**ランダース地震**では、キャンプロック断層の活動周期は数千年、最新活動期は約1000年前以降であり、本断層で連動破壊が止まったが、一方他の3セグメントはやはり活動周期は数千年だが、同程度の期間活動していなかった。このことから断層セグメントの応力蓄積レベルが連動破壊の重要な要素であることが推測される。また、ジョンソンバレー断層北部は未破壊。同断層南端から始まった破壊は、途中で屈曲するジョンソンバレー断層北部を避けて屈曲の度合いが低い併走するホームステッドバレー断層に転移したように見えることから破壊開始点も重要であると指摘されている。したがって各断層セグメントの応力蓄積レベルが同程度に高い場合には、破壊開始点の位置と破壊伝播方向によって、破壊する断層セグメントの組み合わせが変わる可能性があることが示唆される。さて、室内実験で得られた摩擦構成則で断層配置、応力状態、断層強度、破壊開始点などのパラメータを与えれば断層上をどのように破壊が伝播し、どこでどれだけの滑りが生じ、どこで破壊が止まるのかシミュレート可能であるといわれるが、実際の自然現象である活断層による地震に適用するには多くの問題が未解決である<sup>84)</sup>。

まず、各パラメータの精度である。

#### (1) 断層の幾何学的配置

日本列島のような活発な自然環境下では、埋積・浸食による活断層地形・露頭の消失・不明瞭化が著しく、特に都市部では人工改変によって消失する場合が頻繁で、その精度を高めることはかなり困難である。また、深部構造(地下でどのようにつながっているか)については、後述するようにさらに困難さが増す課題である。

#### (2) 応力状態・断層強度

少なくとも見かけ上一様均質な岩石片を用いた三軸圧縮試験などによって岩石物性値に関する知見は集積されてきているが、不均一多様な地殻上部に直接的に外挿することは必ずしも妥当ではない。したがって平均的・不確実な活動履歴をもとに応力蓄積レベルという形で大まかに推測するのが現状であり、現実の断層上の詳細な応力分布を得ることも極めて困難である。



### (3) 破壊開始点

地震ごとに位置が大きく異なる事例が多く、次の地震の破壊開始点を実際的に予測する方法は現時点では未確立である。

以上を考慮すると、天体の運行予測のような決定論的な予測は不可能に近いと言わざるをえないので確率論的な予測の精度向上を図るしかないが、それとても降水確率より一段と精度は低いのが現状である。

## 3.7 活断層の深部構造

一般に(教科書的には)断層は、主応力軸の配置によって正断層・逆断層・横ずれ断層(走向移動断層)に区分される(いわゆる古典的なアンダーソンによる断層の力学的分類<sup>85)</sup>)。この場合、正断層は高角、逆断層は低角、横ずれ断層は垂直な断層面を示すことが想定される。もちろん実際には高角の逆断層や対角位にずれが生じる断層などがあり、複雑であるが、いずれにしても特に大規模な地表ないし地下浅部で観察される活断層の断層面が地下深部でどのようになるかは、地質断層にも共通する重要な課題である。

活断層はじめ地質構造は、本来的に3次元構造であるから地表部だけの平面的な構造や配置などを知るだけでは十分ではなく、それらの深部構造を知る必要がある。これはその全容を目視・観察することはできないから、深部ボーリングや各種物理探査及び室内実験(岩石物性試験や模擬実験及びコンピュータ・シミュレーションを含む)結果等を総合的に勘案して推測されるべきであるが、難しい。内陸大地震の震源深さは10~15 km程度が多く、この付近の岩盤は深さ15 kmで圧力350 MPa(3500気圧)、温度300°C程度である。また、水は374°C、220気圧で超臨界状態になり、通常とはまったく異なる挙動をとるから断層運動への影響も考慮されねばならない。こうした状況下で地震を発生する活断層の破碎帯や断層面の形状が地表ないし地下浅部と同じか否かは、実際にはわからないというのが現状である。反射法地震探査によるデータも一般に深さ数kmで、震源断層の深さに達していない。断層面が、地下深部にどのように延長されるかは、構造地質学の古典的な課題でもあり、Thin skin theoryやthick skin theoryの対立、正・逆リトリック断層などの議論がある(一部、以下に要約。垣見・加藤(1994)<sup>53)</sup>参照)。

**リトリック断層**:リトリック(listric)という語は、ギリシャ語のシャベルを意味するリストロン(listron)に由来し、断層面の形状がシャベル面のような曲面を呈することを意味する。すなわち、地表部で高角な断層面が地下深部に行くにつれ低角ないしほぼ水平になる。本断層は、延性的な岩石の上に脆性的な岩石が乗っているような系で形成される。言い換えれば、断層面の深部での低角化は、深さとともに岩石の延性度が増加することを意味する。従来、露頭規模の断層で観察されている程度で重要視されてこなかった

が、人工(反射法)地震波探査による堆積盆断面での大規模なリトリック断層が推定されるようになってきた。造構運動を反映した大規模な正断層は、地表や地下浅部で高角の断層面を呈するのが一般的であるが、高角の断層面がそのまま地下深部まで続いていく場合(Thick skin theory)と、地下深部で低角に変化していく(Thin skin theory)、すなわちリトリック断層となる場合が考えられる。例えば、東北地方の脊梁山地を横断する反射法地震探査結果から活断層の深部形状や関連褶曲についてThin-skinned tectonicsの適用可能性が示唆された<sup>86)</sup>。また、近年の弾性波探査結果を見ると、伸張盆地を規制するような正断層では後者のタイプが優勢なようである。リトリック正断層は、従来重力滑動のupdip segmentと見なされてきたが、現在ではプログラダーション(プログラダーションとは、陸地から供給される堆積物によって海岸線が海の方に進出すること)な砂岩下の厚い頁岩を含む激しく沈降する大規模な準堆積性断層の一特殊形態と見なされるようになった。一方、地表や地下浅部で低角をなす逆断層でも、深部で高角に変化していくことが知られている。リトリック逆断層は、従来デコルマン構造をとるいわゆるThin-skinned tectonicsの基本要素と考えられてきたが、今ではプレート収束時における延性的な地殻中で発達する必須の構造要素と見なされるようになった。この他、いわゆるflake tectonicsによるデタッチメントモデルの当否も今後の課題である<sup>87)</sup>。

**フラワー・ストラクチャー**(フラワー構造・花卉状構造・椰子の木構造):横ずれ断層(走向移動断層)では、地表部や浅層部(堆積被覆層)で主断層に対してしばしば分岐・雁行断層が発達する。これらは、深部基盤中では主断層に収れんしていくことが想定され、その断面形状からフラワー・ストラクチャーと称される。逆隔離が卓越する断層からなる「正のフラワー・ストラクチャー(positive flower structure)」と正隔離が卓越する断層からなる「負のフラワー・ストラクチャー(negative flower structure)」がある。前者の例が、南カリフォルニアのVentura盆地で、後者の例がアラビア半島の死海盆地である<sup>53)</sup>。

いずれにしてもこれらの断層深部構造の概念は、地質プロセス・地質構造発達史における(重力場における広域造構応力場の変遷を考慮した)大規模な堆積作用(堆積盆形成など)や造構運動を規制する大規模な断層に適用されるべきで、露頭規模や小規模な断層の深部形状に無批判に適用すべきではない。地表の活断層形状と深部のそれ、さらに震源断層との関係についてはまだ未明なことが多く、例えば地震の発生頻度などの過大評価あるいは過小評価に陥る愚を避ける慎重さが求められる。



### 3.8 活断層の平面形態

#### 3.8.1 横ずれ断層における末端問題

トランスフォーム断層においては断層の末端は解消されるが(すなわち末端部は断層に沿う全変位を調節する構造様式(伸張・短縮ほか)で終わる),内陸の横ずれ活断層が属するトランスカレント断層については未解決である。なお,トランスフォーム断層とトランスカレント断層の要約的な比較表は筆者によって提示されているので参照されたい<sup>53)</sup>。

1つの横ずれ断層セグメントの末端部には,ずれの向きに応じて圧縮領域と引っ張り領域が生じる。そしてそれらがその岩盤の破壊・変形条件を満たせば,圧縮領域には地形的な高まり(圧縮ブリッジ compressive bridge・プレッシャーリッジ pressure ridge や push up 構造など)や逆断層,褶曲の形成が起こり,引っ張り領域においては構造凹地・堆積盆(tectonic depression や strike-slip basin),正断層や伸張裂罅などが形成される。複数の併走するセグメントがある場合には,いわゆる pull-apart basin の形成による横ずれ変位の解消も検討されるべきである(例えば, Aydın, A and Nur, A (1982)<sup>88)</sup>, 加藤(1991)<sup>89)</sup>。

このとき見落としてはならないのは,セグメントの規模である。大規模であるほど単なる幾何学条件を無条件に適用することは避けるべきで,地質条件(テクトニクスの枠組みや構造発達史など)が考慮されなければならない。いずれにしても横ずれ断層のセグメントでは,断層に沿う変位量は変化し,一般に末端部に向かって減少する。しかし,個別具体的な断層についてどのように変位やひずみが解消されていくかについてはいくつかの事例をあげることはできるが(例えば<sup>53)</sup>の図3.29参照),通則性を確保するにはいたっていない。

特にトレンチ調査において掘削箇所を選定する際に,断層線末端部が一般的な断層の走向と異なる場合(弯曲するなど)があり,断層が新期堆積物で被覆埋積されやすい沖積低地では注意が必要である。例えば静岡県の丹那断層を掘削した田代トレンチや大沢池トレンチ,岐阜県の根尾谷断層東南部の佐野トレンチなどにおいてトレンチ面に断層が認められなかったのは断層線の通過位置を結果的に誤認したことによることが指摘されており,このように断層末端部は断層主部と異なる位置・形状や活動を示す場合があるので,すでに「断層末端部や分岐断層(ないし副断層)などでのトレンチ調査は問題がある。」と指摘されている<sup>4)</sup>。

#### 3.8.2 活断層セグメント分岐・並走問題

「地震断層にともなう地殻変動は,かなりの拡がりをもった複雑なもので,単に積木のようなものがずれたのではない<sup>1)</sup>」という指摘に対して再度喚起したように,第一近似的には岩盤を完全弾性体とみなし,かつ主断層が1つの平板状をなすとして各種の計算やシ

ミュレーションを行うにしても,実際に自然の断層にその結果を適用する場合はその十分条件をよく吟味すべきである<sup>28)</sup>。

さて,(地表)地震断層は,従来次のように区分されてきた<sup>18),90),91)</sup>。

(1) 狭義の地震断層(主断層):震源断層が直接に地表まで達したもの。必ずしも単一の断層面ではない。

(2) 副断層:震源断層(主断層)から分岐または並走したり,その動きに誘発されたと考えられる小規模な地震断層。

(3) 二次の断層:地震に伴う地殻変動,あるいは強い地盤変動によって破壊され,重力の作用で変位した断層。正断層型が多い。(例:関東大地震に伴う延命寺断層ほか)

(4) 測地学的地震断層:地表では確たる断層が観察されなくとも,測量によって変位が地表に到達していることがわかる断層。(例:福井地震断層)

これらの区分で(4)はやや異なるカテゴリーであり,また(3)は最近では(地表)地震断層に含めない傾向にあり,また用語として「二次」secondary というのは必ずしも適当ではなく混乱を招きかねない。以下,検討する(2)の場合において「二次」secondary という用語は(3)の意味合いとは異なり,本来の成因的な意味合いで用いていることを指摘しておく。

主断層が走向移動断層(横ずれ断層)である時,二次さらに三次の断層や関連する地質構造(褶曲など)がどのように発達するかという課題は構造地質学の古典的な断層問題の1つである。例えば,理想化された一次二次三次の走行移動断層とそれに伴う褶曲軸および衝上断層の模式配置図が示されている<sup>50),92)</sup>。しかし,現実に二次以下の断層が生じるか否かは,応力配置だけで決まるものではなく,その岩石(岩盤)の破壊条件を満足させるか(例えば,差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ が破壊強度を上回るに十分か否か)や,Drag fold(引きずり褶曲)の形成条件・形成機構を満たしているかななどによる。かりに二次以下の断層が形成されなくても,それらの変位量は主断層(一次)に比して著しく小さいことは自明である。また,上述のように横ずれ断層についてはセグメントのステップやプル・アパート・ベイسنの問題などあるが割愛する<sup>18),89)</sup>。

以上の検討は,一次とそれ以下の断層が地質学的に広域的な同一の応力場で同時に形成される場合を想定しているが,現実には対象とする活断層(系)の形成以前に生じた既存断層セグメントが主断層近傍に存在する場合,それをどのように評価するかは難しく,広範な(さまざまな前提条件・境界条件下で)シミュレーションを行うほか方法論的に手がない状況である。

#### 3.8.3 活断層の長さや発生する地震の規模

日本列島内陸部(イントラプレート)の起震断層の

長さ $L$ とその全長が地震活動を起こすとき(いわゆる「一括放出モデル」)のマグニチュード $M$ との関係式(いわゆる「松田式」)として $\text{Log } L = -a + \beta M$ が提唱され、 $a = 2.9$ 、 $\beta = 0.6$ とされた<sup>93)</sup>。これは $M = 7.0$ で $L = 20$  km、 $M = 8.0$ で $L = 80$  kmに相当する。これは、地形・地質学的データと地震学的データを定量的に結びつけた画期的な提案であり、その後広く適用されてきた。また、データの拡充による精度の向上、また地域性や断層タイプ依存性の吟味が望まれていくつかの試みがなされてきた。例えば、松田式を介して $L$ から変換される $M$ 値の統計分布が歴史地震の $M$ 値の統計分布に等しいと仮定して $a$ と $\beta$ の再決定が試みられた<sup>94)</sup>。この仮定はなお吟味が有するが、現時点では $a = 3.56$ 、 $\beta = 0.703$ となる結果は有意性があると思なされる。さらに、断層データカタログ<sup>78)</sup>・<sup>96)</sup>を用い、また地震地体構造区分<sup>97)</sup>を考慮して松田式の係数 $a$ 、 $\beta$ の地域性と断層タイプ依存性が検討された。その結果、逆断層・横ずれ断層とも地質学的な東北日本(糸魚川―静岡構造線以東)の係数はともに西日本のそれらより有意に大きく、したがって地域性があることが指摘された<sup>95)</sup>。この地域性の要因として、両者の置かれたテクトニックセッティングの相違(前者は太平洋プレートに、後者はフィリピン海プレートの支配下にあるので、これらのプレート運動が列島地殻に及ぼす力学的影響の差異に起因して、東北日本では逆断層が卓越し、西南日本では逆断層も共在するが横ずれ断層が卓越することに関連する可能性)を示唆した。そして逆断層の係数よりも横ずれ断層の係数のほうがともに相対的に大きいこと、すなわち断層タイプ依存性があることも指摘した。このことは、地震エネルギーを逆断層運動によって消費するよりも水平断層運動に消費するほうが効率よく断層の水平変位を大きくすることができる、すなわち $M$ が同じでも係数が大きい値をとる地域では断層の水平変位が相対的に大きくなることを示唆した。また、定性的ではあるが、岩石の引っ張り強度は圧縮強度に比べて一桁以上小さいから、正断層では大きな $M$ の地震は生じにくいといえよう。また、すでに指摘されたように<sup>98)</sup>・<sup>99)</sup>、活断層は単に現在の応力場に応じた断層の走向と変位の方向を示すのではなく、古傷としての断層の存在のもとに新しい応力場に対応しているのだという考え方もさらに吟味されるべきである。

#### 4. おわりに

隕石が直撃する可能性がゼロとは言えないから、すべての建造物はそれに耐える設計にすべきであるというのは現実的ではない。発生が極めて低確率の地質事象について社会的にどこまでリスクを許容できるかが問題である。建築基準法による耐震設計は、「地震荷重に対する建物の規定であり、活断層により地表に断層が出現し、それによる地盤変形などへの対策は全く

の想定外である。」<sup>100)</sup>とされている。しかしながら鉄道・自動車道・橋梁等の人工線構造は、往々にして活断層通過位置を避けられない場合がある。このような場合もゼロリスクの立場に立つのではなく、活断層の有無にかかわらず全線の耐震性向上を図り、リスクの最小化に努めるのが現実的な対応である。例えば、真下に活断層が確認されているとされるJR西日本・山陽新幹線新神戸駅駅舎は上りと下りホームと、線路部分の三つのブロックに分け、活断層の揺れを吸収する設計を採用しているという(読売新聞朝刊、2013.3.29)。今後は、兵庫県南部地震で倒壊した阪神高速道路の事例を教訓とし、既存構造物において設計通りの施工がなされているか、経年劣化による影響がどのようであるかなどをモニターし、維持管理、必要ならより一層の耐震強化や立て直しを視野に入れた中長期的社会インフラ整備の観点を進めていくべきである。「防災」は理念としてはあらまほしきであるが、可能な限りの「減災」を図ることが現実的である。そのための活断層・活火山データの一層の集積とそれに基づく多面的な検討・評価が望まれる。と同時にアウトリーチの重要性が指摘される。伝え聞くところによれば、1995年の「兵庫県南部地震」に際して当該地域の地方自治体の防災担当者らは、市販されている地質図幅の存在すら知らなかったそうで、また読んでも理解しえなかったことであろう。いかにわかりやすく伝えるか、また、のど元過ぎれば熱さを忘れがちなマスコミや国民性からして、どのように繰り返しさまざまなレベルで啓発し続けるかは、活火山・活断層研究等に関与するものの責務であろう。

#### 参 考 文 献

- 1) 大塚弥之助(1936):昭和10年4月21日台湾中部地方に起こった地震に伴る地震断層,付地震断層の諸特徴,地震研彙報別冊,3,22-74.
- 2) 岡田篤正・安藤雅孝・佃 為成(1987):山崎断層系安富断層のトレンチ調査,地学雑誌,96,81-97.
- 3) 第3次丹那断層発掘調査研究グループ(1988):1985年丹那断層(丹那・子乃神地区)トレンチ調査,活断層研究,5,42-49.
- 4) 岡田篤正(1995):トレンチ法による活断層調査の現状と展望,地理,40,41-56.
- 5) 中田 高(1990):カリフォルニア州の活断層法「アルキストープリオロ特別調査地帯法」(Alquist Priolo Special Studies Zones Act)と地震対策,地学雑誌,99,289-298.
- 6) 山崎晴雄(1995):活断層の危険度と土地利用規制,環境情報科学,24,17-22.
- 7) 中田 高(2008):活断層研究の将来について,活断層研究,28,23-29.
- 8) 東京地学協会編(1914):英和 和英 地学字彙,

- 良明堂, 274p.
- 9) 横山又次郎 (1896): 地質學教科書, 富山房, 363p.
  - 10) 横山又次郎 (1913): 陸文學講話, 早稲田大學出版部, 314p.
  - 11) 井原 儀 (1914): 地學講話 地熱の作用, 大同館, 400 p.
  - 12) 横山又次郎 (1919): 地質學攬要, 早稲田大學出版部, 378p.
  - 13) 佐藤傳藏 (1928): 地質學提要, 中興館, 405p.
  - 14) 木下亀城・石井清彦・青山信雄・赤城健・村山賢一・佐藤戈止・鈴木達夫共編 (1943): 英和和英. 鑛物辭典, 大観堂, 128p.
  - 15) Willis, B. (1923): A fault map of California, Seis. Soc. Amer. Bull., **13**, 1-12.
  - 16) 多田文夫 (1927): 活断層の二種類, 地理学評論, **10**, 980-983.
  - 17) Neuendorf, K. K. E., Mehl, J. P. Jr. and Jackson, J. A. (2005): *Glossary of Geology*, Fifth ed., Am. Geol. Inst. 779p.
  - 18) 加藤碩一 (1989): 地震と活断層の科学, 朝倉書店, 280p.
  - 19) 大塚弥之助 (1948): 活断層, 休断層, 癒着断層 (又は死断層), 科学, **18**, 457-458.
  - 20) 池田安隆 (1996): 活断層の地震危険度評価「我々は何をすべきか」活断層研究, **15**, 59-63.
  - 21) 徳山 明 (2013) 「原発と活断層の評価」エネルギーフォーラム, **6**, 114-117.
  - 22) 杉村 新 (1974) 関東地方と活断層, ラティス, 157-174.
  - 23) 真保祐一 (1993): 震源, 講談社, 393p.
  - 24) 第四紀地殻変動研究グループ (1969): 第四紀地殻変動図, 国立防災科学技術センター, 6p.
  - 25) 第四紀地殻変動研究グループ (1973): 第四紀地殻変動図及び同説明書, 国立防災科学技術センター, 167p.
  - 26) 松田時彦・岡田篤正・藤田和夫 (1976): 活断層分布図とカタログ, 地質学論集, **12**, 185-198.
  - 27) 垣見俊弘・衣笠善博・加藤碩一 (1978): 日本活断層図 (1:2, 000, 000), 地質調査所.
  - 28) 杉村 新 (1979): 活断層の研究, 文部省科学研究費 自然災害特別研究成果, No. A-54-4 「活断層の分布・活動度と地震危険度」, 8-14.
  - 29) 活断層研究会編 (1980): 日本の活断層 - 分布図と資料, 東京大学出版会, 363 p.
  - 30) 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, 437 p.
  - 31) 星野一男・橋本知昌・松田時彦 (1978): 伊豆半島活断層図 (1:100, 000及び 1:50,000) 及び説明書, 地質調査所, 8p.
  - 32) 岡田篤正 (1979): 愛知県の地質・地盤 (その 4) [活断層] —愛知県と周辺地域における活断層と歴史地震—, 愛知県防災会議地震部会, 122 p.
  - 33) 仁科良夫・松島信幸・赤羽貞幸・小坂共栄 (1985): 長野県の活断層—活断層分布図と資料—, 信州大学理学部紀要, **20**, 171-198.
  - 34) 九州活構造研究会編 (1989): 九州の活構造, 東京大学出版会, 553p.
  - 35) 岡田篤正・東郷正美編 (2000): 近畿の活断層, 東京大学出版会, 59p. + 付図.
  - 36) 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・佐藤比呂志 (2002): 第四紀逆断層アトラス, 東京大学出版会, 254 p.
  - 37) 中田 高・岡田篤正 (1990): 活断層詳細図 (ストリップマップ) の作成の目的と作成基準について, 活断層研究, **8**, 59-70.
  - 38) 千田 昇 (1990): 九州における活断層ストリップマップの試作, 活断層研究, **8**, 105-113.
  - 39) 今泉俊文 (1990): 活断層詳細図の凡例—仙台平野西縁活断層系の例—, 活断層研究, **8**, 91-96.
  - 40) 渡辺満久 (1990): 活断層時代の違いに基づく活断層詳細図の表現—テフラクロノロジーからみた北上低地西縁活断層群 (南半分) の例—, 活断層研究, **8**, 71-79.
  - 41) 太田陽子・山下由紀子 (1992): 三浦半島の活断層詳細図の試作, 活断層研究, **10**, 9-26.
  - 42) 藤森孝俊・太田陽子 (1992): 諏訪盆地の活断層図—試作例—, 活断層研究, **10**, 27-39.
  - 43) 岡田篤正・池田安隆・中田 高 (2006): 1:25, 000 都市圏活断層図 阿寺断層とその周辺 「萩原」「下呂」「坂下」「白河」 解説書, 国土地理院技術資料 D・1-No. 458.
  - 44) 今泉俊文・東郷正美 (2007): 1:25,000 都市圏活断層図「庄内平野東縁断層帯とその周辺」「庄内北部」「庄内南部」 解説書 国土地理院技術資料 D・1-No. 496.
  - 45) 岡田篤正・中田 高・池田安隆 (2007): 1:25, 000 都市圏活断層図 境峠—神谷断層帯とその周辺「梓湖」「塩尻」「木曾駒高原」 解説書, 国土地理院技術資料 D・1-No. 495.
  - 46) 岡田篤正 (2008): 日本における活断層調査研究の現状と展望, 活断層研究, **28**, 7-13.
  - 47) 山崎直方 (1896): 陸羽地震調査概報, 震災予防調査會報告, **11**, 55-74.
  - 48) 松田時彦・山崎晴雄・中田 高・今泉俊文 (1980): 1896年陸羽地震の地震断層, 震研彙報, **55**, 795-855.
  - 49) 大沢 穠・池辺 穰・平山次郎・栗田泰夫・高安泰助 (1984): 能代地域の地質 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 91p.
  - 50) Moody, J. D. and Hill, M. J. (1956): Wrench-Fault tectonics, *Bull. Geol. Soc. Am.*, **76**, 1207-1248.
  - 51) Philip, H. and Meghroui, M. (1983): Structural

- analysis and interpretation of the surface deformations of El Asnam earthquake of 10 October 1980, *Tectonics*, **2**, 17-49.
- 52) Philip, H. and Megard, F.(1977) : Structural analysis of the superficial deformation of the 1969 Paviahuanca earthquakes (central Peru). *Tectonophysics*, **38**, 259-278.
- 53) 垣見俊弘・加藤碩一(1994) : 地質構造の解析—理論と実際—, 愛智出版, 274 p.
- 54) 松田時彦・岡田真介・渡邊トキエ(2004) : 横ずれ活断層の累積変位量・断層長・破碎帯幅から見た断層の発達度—中国地方と中部地方の比較, 活断層研究, **24**, 1-12.
- 55) 道家涼介・谷川晋一・安江健一・中安昭夫・新里忠史・梅田浩司・田中竹延(2012) : 日本列島における活断層の活動開始時期の空間的特徴, 活断層研究, **37**, 1-15.
- 56) 吉村辰朗(1992) : 活断層調査のための $\gamma$ 線測定方法, 活断層研究, **10**, 73-83.
- 57) 吉村辰朗(2006) : 破碎帯の生長過程から推定される活断層の発生数と発生時期—破碎帯の累積性とべき乗則, 活断層研究, **26**, 7-14.
- 58) 吉村辰朗(2007) : 破碎帯幅の関係式から検討したC級活断層問題, 活断層研究, **27**, 37-48.
- 59) 吉村辰朗(2010) : 破碎帯を尺度とした活断層の活動評価—破碎帯と断層長の関係式—, 活断層研究, **33**, 39-49.
- 60) 吉村辰朗(1994) : 活断層調査における $\gamma$ 線測定の可能性—断層場幅と地質年代による活断層の活動度評価—, 日本地理学会予稿集, **45**, 204-205.
- 61) 吉村辰朗・間野道子(2004) : 破碎帯の度数分布より推定される第四紀地殻変動, 地球惑星科学関連学会2004年合同大会予稿集, T054-009.
- 62) 垣見俊弘・衣笠善博・鈴木尉元・小玉喜三郎・三梨昂(1977) : 1974年伊豆半島沖地震に関する地質学的調査, 地質調査所特別報告, **6**, 1-35.
- 63) 垣見俊弘(2010) : 活断層の成熟度について, 活断層研究, **32**, 73-77.
- 64) Tsuneishi, Y., Yoshida, S. and Kimura, T. (1975) : Fault-forming process of the Komyo fault in central Japan” *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **50**, 415-442.
- 65) Kakimi, T. and Kinugasa, Y.(1976) : A geologic significance of the Irozaki earthquake fault, view from “maturity” of faulting. *Jour. Geodetic Soc. Japan*, **22**, 278-279.
- 66) 井上大栄・宮越勝義・上田圭一・宮脇明子・松浦一樹(2002) : 2000年鳥取県西部地震震源域の活断層調査, 地震, **54**, 557-573.
- 67) 伏島祐一郎・井村隆介・森野道夫・杉山雄一・水野清秀(2002) : 2000年鳥取県西部地震断層のトレンチ掘削調査, 活断層・古地震研究報告, 産総研, **2**, 183-208.
- 68) 岡田篤正(2002) : 山陰地方の活断層の諸特徴, 活断層研究, **22**, 17-32.
- 69) Kanamori, H. and Allen, C. R. (1986) : Earthquake repeat time and average stress drop, in Earthquake Source Mechanics, S. Das et al. (eds.), Geophysical Monograph, **37**, 227-235.
- 70) Wesnousky, S. G.(1988): Seismological and structural evolution of strike-slip faults, *Nature*, **335**, 340-343.
- 71) Anderson, J. G., Wesnousky, S. G. and Stirling, M. W. (1996): Earthquake size as a function of fault slip rate, *Bull. Seismo. Soc. Am.* **86**, 683-690.
- 72) 高橋尚子・隈元 崇(2006) : 日本の内陸被害地震に先行する地震活動の変化と断層成熟度との関係, 活断層研究, **26**, 15-28.
- 73) Manighetti, I., Campillo, M., Bouley, S. and Cotton, F.(2007) : Earthquake scaling, fault segmentation, and structural maturity, *Earth and Planetary Science Letters*, **253**, 429-438.
- 74) 平林照雄(1967) : 糸魚川・静岡線北部地域の地質構造, 長野県教育センター紀要, no. **1**, 51-75.
- 75) 仁科良夫(1973) : 大峯変動について, 信濃教育, **1040**, 51-64.
- 76) 加藤碩一・佐藤岱生(1983) : 信濃池田地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 地質調査所, 93p.
- 77) Phan Trong Trinh, Ngo Van liem, Nguyen Van Huong, Hoang Quang Vinh, Bui Van Thom, Bui Thi Thao, Mai Thao, Mai Thanh Tan and Nguyen Hoang (2012) : Late Quaternary tectonics and seismotectonics along the Red River fault zone, North Vietnam, *Earth-Science Reviews*, **114**, 224-235.
- 78) Kumamoto, T. (1999) : Seismic hazard maps of Japan and computational differences in models and parameters, *Geographical Rev. Japan, ser. b.* **72**, 135-161.
- 79) 萩原幸男・糸田千鶴(2006) : セグメント化された起震断層帯の長さの統計モデル, 活断層研究, **26**, 1-6.
- 80) 松田時彦(1991) : 起震断層と地震に関する2つの仮説(紹介)—活動間隔と断層の長さおよび断層線形態と累積変位量, 活断層研究, **9**, 6-10.
- 81) 松田時彦(2008) : 活断層研究の歴史と課題, 活断層研究, **28**, 15-22.
- 82) 中田 高・隈元 崇・熊原康博・山中佳子(2004) : 「形態単位モデル」による一括活動型活断層の設定と起震断層の再検討, 活断層研究, **24**, 39-

- 48.
- 83) 遠田晋次(2011):中部地方の活断層の相互作用と連動・連鎖性の評価—天正地震を例にして—, 活断層研究, **35**, 41-50.
- 84) (独) 産業技術総合研究所(2006):産総研ブックス きちんとわかる巨大地震, 白日社, 281p.
- 85) Anderson, E. M.(1951): The dynamics of faulting, 2nd ed. Oliver and Boyd, 206p.
- 86) 佐藤比呂志・吉田武義・岩崎貴哉・佐藤時幸・池田安隆・海野徳仁(2004):後期新生代における東北日本中部背弧域の地殻構造発達史—最近の地殻構造探査を中心として, 石油技術協会誌, **69**, 145-154.
- 87) 池田安隆(1992):日本の逆断層「flake tectonicsの可能性について」月刊地球, 号外5, 117-120.
- 88) Aydin, A. and Nur, A. (1982): Evolution of pull-apart basins and their scale independence, *Tectonics*, **1**, 91-105.
- 89) 加藤碩一(1991):PULL-APART BASINの概要, 構造地質, **36**, 3-18.
- 90) Bonilla, M. J. (1970):*Surface faulting and related effects*. Chap. 3, Earthquake Engineering (Wiegel, R. L. ed. ), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 47-74.
- 91) 岡田篤正・安藤雅孝(1979):日本の活断層と地震, 科学, **49**, 158-169.
- 92) Badgley, P. C.(1965): *Structural and tectonic principles*, Harper and Row, 521p.
- 93) 松田時彦(1975):活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震2, **28**, 269-283.
- 94) 萩原幸男・糸田千鶴(2003):起震断層長とマグニチュードを結ぶ松田式の係数の統計学的推定, 活断層研究, **23**, 1-4.
- 95) 萩原幸男・糸田千鶴(2004):松田式係数の地域性と断層タイプ依存性, 活断層研究, **24**, 33-37.
- 96) Kumamoto, T. and Yamada, S. (2004): Magnitude -frequency distribution derived from earthquake and active fault catalogues based on seismotectonic province map of the Japanese Islands”, *Active Fault Research*, **24**, 13-31.
- 97) 垣見俊弘・松田時彦・相田 勇・衣笠善博(2003):日本列島と周辺海域の地震地体構造区分, 地震2, **55**, 389-406.
- 98) 杉村 新(1978):自然の語る大地の動き, 土と基礎, **26**, 79-84.
- 99) 貝塚爽平(1995):日本における活断層研究の歴史, 活断層研究資料センター資料集「活断層研究の歴史と現状—阪神・淡路大震災をふまえて—, 1-15.
- 100) 久田嘉章(2008):活断層と減災対策, 活断層研究, **28**, 77-87.