

〔特別講演〕地質学的にみた地震と断層

東京大学地震研究所 松田時彦

地震は断層に沿う岩石の剪断上りに伴って発生する波動であるという考えは、前世紀の地震原因論の中でも有力な仮説であったが、最近の地震学はこの考えを確認してきている。大きな地震が発生すると世界各地から地震波の記録をみつめて、どんなむきの断層面がどこに生じ、それに沿って岩石がどの方向にどれだけ上り、それに伴って周辺の応力がどの位変化したか、を知ることができるようになった。

地震の実体が断層現象だとすると、過去の大地震は地質学的な実体である断層やその周辺の岩石の状態の中に記録されている筈である。とくに被害をもたらすような浅くて大規模な地震では、地下の震源付近に生じた断層面は地表まで達して、地形にもその運動が保存されている。以下、断層と地震の関係を、このような立場から考えてみる。

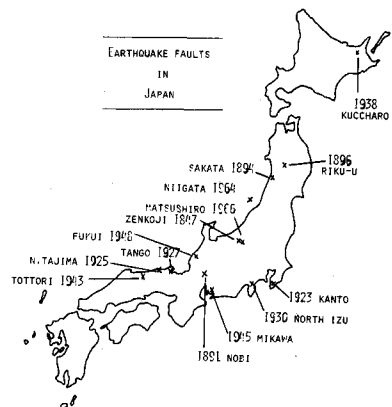
§1. 断層の種類と地震

断層は、それを境にして両側の岩石などが互にすれちがうように動く面のことである。この面と地表面との交線を断層線という。断層に沿って両側の岩石が相対的に変位することを断層運動あるいは「断層が動く」という。断層運動は断層面上でのベクトルであらわされるが、このベクトルのむきと断層線や断層面の傾斜との関係によって、断層は縦ずれ断層 (dip-slip fault) と横ずれ断層 (strike fault) に分けられ、さらにそれぞれは正断層 (normal fault)・逆断層 (reverse fault) と左ずれ断層 (left-lateral fault)・右ずれ断層 (right lateral fault) にわけられる。

上記のどのタイプの断層も大地震を発生し得るが、環太平洋地域沿岸沖合で生ずる巨大地震は大部分逆断層である。これに対して、正断層はその規模も発生する地震も小型のことが多い。日本の地殻でおこる被害地震はほとんどすべて横ずれ断層と逆断層である。

火山に活火山・死火山の区別があるように、断層にも、最近の地質時代や歴史時代に活動していて将来も同様に活動すると思われる断層もあるし、地質時代の遠い過去にだけ変位してその後は活動していない断層もある。前者を「活断層」という。活断層の動き方として、大地震の時だけ変位するものもあるし、地震なしに文字通り常時変位しつづけているものもある。後者のような動き方は tectonic creep とよばれ、そのような活断層をとくにクリープ性活断層といふことがある。活断層はまたその変位運動の平均速度の大小によって、A級・B級・C級のように格付けすることもできる。

地震の時に地表にあらわれた断層を「地震断層」という。大部分の地震断層は地下で地震を起した断層の変位が地表まで達したものと考えられるが、一部の地



第1図 日本の地震断層分布図

震断層はそのような性状を示さず、むしろ地震の結果（岩石や地塊の震動の結果または地震発生によって生じた地殻応力や地殻変形のために震源からはなれた所で）生じたと考えられるもの（間接的地震断層）もある。

§. 2. 活断層系の形態と地震時の変位分布

活断層は1つだけ単独で存在することはまれで、通常何本か寄り集まって、1つの「活断層系」をつくっている。日本の活断層系では、長さ10km程度の断層がやや雁行しながら平行状（中央構造線など）あるいは羽毛状（根尾谷断層系や北伊豆断層系）、あるいはアバラ骨状（阿寺断層系）に集合していることが多い。断層系を構成する各断層のうち、似た走向をもつものは共通の変位傾向をもつが、走向の著しく異なった断層は対照的な性質（たとえば、右ずれと左ずれの違いなど）を示し、共役の関係にあると考えられる。1つの活断層系にこのような共役の関係にあると思われる2つの系統の断層がふくまれていることはしばしばある。

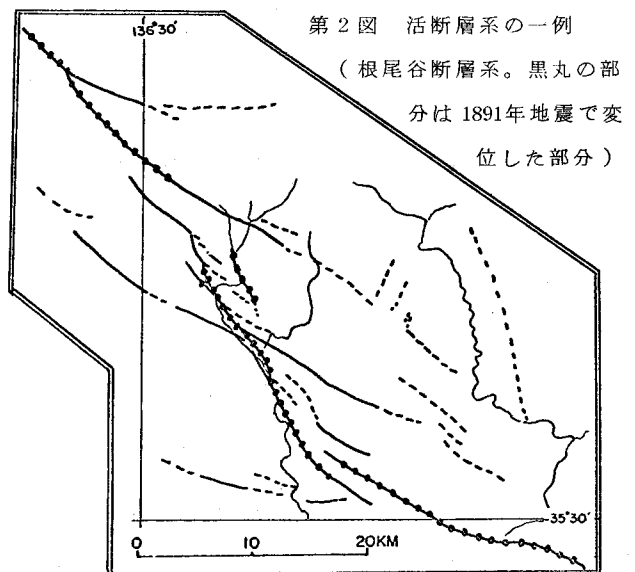
日本の大地震の多くは、このような活断層系から発生しているが、これまでの例をみると、その地震によってその断層系を構成しているすべての断層が動くのではなく、その一部の、いくつかの断層だけが動く。1つ1つの断層ではその中央部で変位量が最大で端へむかって減り、代りに近傍にある別の断層が変位量を受けついでゆく。このような変位する場所の「乗り換え」現象は、濃尾地震の際に典型的にあらわれた（第2図）

活断層系を構成する各断層の地震時における変位量は、上述のように、数mのうちに数mから零になるほど変化するが、変位のむきは終始変化しないのが一般である。しかし、次のように、1つの断層でも場所により変位のむきが反対になる場合がある。横ずれ断層では横ずれのむき（たとえば左ずれ）は不変であるが、それに伴う垂直変位成分（隆起か沈降）は、場所によってむきがしばしば反対になる（たとえば丹那断層の1930年地震の変位）。一方縦ずれ断層では、その縦ずれのむきは不変であるが、それに伴う水平変位成分のむきは断層線の両端で反対になることがある（たとえば深溝断層の1945年変位）。とくに、横ずれ断層に伴う隆起・沈降が場所によって逆転する現象は、シーソー現象あるいはトランスカレントバックリングなどよばれる。この現象は断層線の湾曲や雁行の様式に応じて規則正しくあらわれる場合が多い。

§. 3. 地震時および平時の断層運動

断層の動き方の2つの極端な場合として地震に伴う急激な変位運動と、平時の緩慢な変位運動（テクトニッククリープ）とがある。1つの断層で両方の性質をもつものもあるが、日本の活断層では、変位のほとんどすべては地震時だけに起こり、平時は停止している。

地震時の断層変位は、その地震の初動到



速後おそくとも10秒以内に地表にあらわれ数秒以内に完了するという例が、いくつか日本で経験されている。これは理論的にも変位の伝達はほぼS波の速度で行われるといわれることと調和している。

しかし、サンアンドレアス断層の一部ではもっとずっとゆっくり動き地震後数日たってから地表に変位があらわれた例がある。そういう所では、地震のおこる前にも変位が進行していたり、さらに地震を伴わないで常時変位(クリープ)しつづけている場所もある。この断層の常時変位している部分では大地震は歴史時代におこっておらず、クリープ現象と大地震発生は逆の相関にある。

地震時の変位のむきとクリープのむきは一般に同じである。また、それは、地質や地形の調査からわかる第四紀を通じてその断層の変位のむきとも同じである(ただし前節でのべたのと同じように横ずれ断層の変位に伴う垂直変位成分については必ずしもそうでない)。

大地震時に生ずる変位の大きさは、地震の規模が大きいくほど、大きくなる。日本の地震断層の例ではマグニチュードM7~7.5で変位量Dは約2m, M8以上で5~7m, Mが6.5以下の地震では、断層変位は一般に地表にあらわれない(飯田汲事によると $\text{Log } D = 0.55M - 3.71$)。地表で変位を示す部分の断層線の長さLも地震の規模Mに応じている($\text{Log } L = 1.32M - 7.99$)。このことから逆に長さ30km未満の活断層系から発生する地震は最大M7.5程度までであってM8かそれ以上の地震の発生はまず考えられない。

上記のような地震規模・変位量・断層線の長さの関係は、クリープ性活断層では必ずしも適用できない。サンアンドレアス断層系では、M=6以下の地震でも変位は十分長く地表にあらわれている。

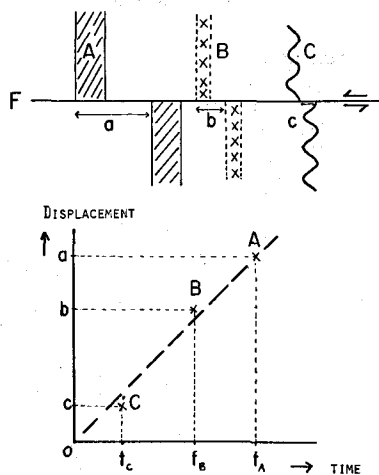
§.4. 地質時代を通じての断層運動

一回の地震で生ずる断層変位の量は、せいぜい10mまでである。一方断層線の両側の地質や地形の喰い違いからわかるその断層の変位量は、数百米から数百キロに及ぶ。その断層がクリープ性の活断層でないならばその大きな変位量は大地震時の変位が累積した結果であると考えられる。

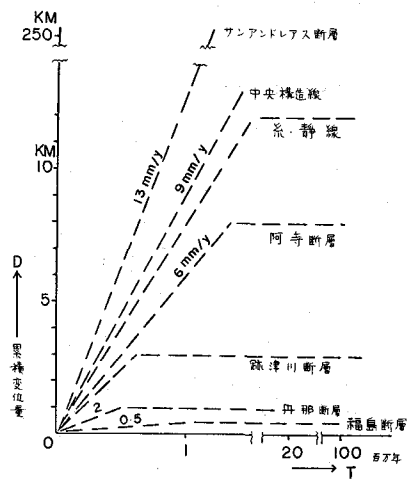
地質時代からの断層の運動の経過は次のようにして求められる。断層は、そこにあった一連の岩石・地質構造、地形ある

いは人工物を断ち切って互に喰い違った位置に変位させる。このような断層変位を知るのに役に立つ事物を基準Reference(それが面状なら基準面、線状なら基準線)という。野外調査によって、できるだけ多くの基準(第3図上のA・B・C……)

を見つけ出し、その基準ができた時代(t_A t_B



第3図 断層運動の平均変位速度を求める例



第4図 主な活断層系の時間-変位量関係図。数値は平均変位速度

…)とその変位量 (a , b , c …) を求めて、第3図下のように A · B · C … のそれぞれについてグラフにプロットする。もし、時代を異にするいくつかの基準の変位量が互に同じならば、その期間にはこの断層は停止していたことを意味するし、もし図の例のように基準の時代が古いほど変位量が大きいという関係があれば、それはその期間にこの断層が同じ方向の変位運動を行っていたことを示している。その場合、このグラフ上で A · B · C … の各点を結んだ線の勾配はその間の変位の平均速度をあらわしている。

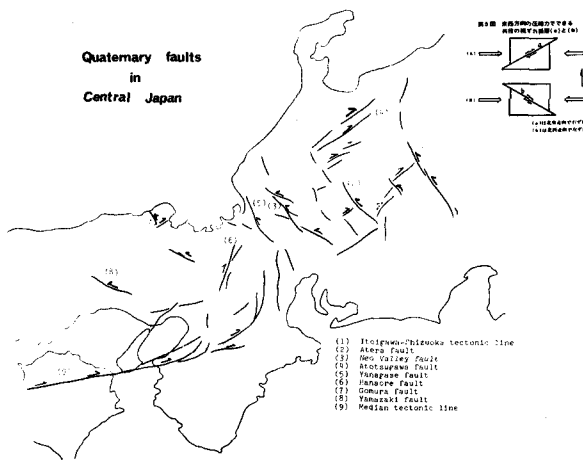
いくつかの実際の活断層についてこのようなグラフをつくったのが第4図である。用いられた基準の年代は古いもので2億年、新しいものは数千年であるが、サンアンドレアス断層を別けると、日本の主要な活断層は、ミリメートル/年のオーダーの平均変位速度をもって最近地質時代の約100万年このかた、すくなくとも最近の数千年まえまで同じ方向の運動をつづけてきていることがわかる。サンアンドレアス断層はもっと古い地質時代から変位をつづけていて、変位量の総計は250 km 以上に達しているが、日本の活断層系の起源は、それよりずっと若く、全変位量も数 km にすぎない(系魚川-静岡線は12 km)。

いずれにしても、活断層系は、長い過去から、“現在”まで同じ傾向の変位をつづけてきているのである。大地震の際の断層変位は、そのような長期間の断層変位運動と同性質であり、長い歴史をもつ断層運動の一瞬である、と考えられる。したがってこのような地質学的に近い過去の活断層の活動を地質学的に近い未来にまで延長して考えてよいと思われる。

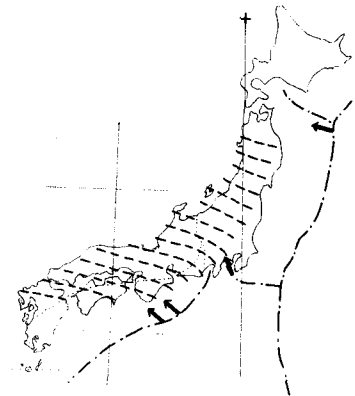
§.5. 断層系と地殻応力場

活断層系が、最近地質時代を通じて同じ傾向で変位をつづけているということは、その周辺の地殻応力場が長期間にわたって安定して存在していることを示唆している。大地震ごとに断層周辺の地殻が破壊され、応力場がそのたびに御破算になるのではないのである。

このような地殻応力場は地理的にも共通の方位をもって拮っているらしい。たとえば、中部日本と西南日本内帯では、横ずれ断層系が卓越的に発達し、しかも第5図にみるように、北西走向の断層は



第5図 中央日本の主な活断層。小さな矢印は変位のむき。北西走向の断層は左ずれ、北東走向は右ずれ。



第6図 活断層から推定される日本島地殻内主応力軸(最大圧縮)の方向(太破線)。太矢印は海溝(鎖線)付近に起こる巨大地震のスリップベクトル。

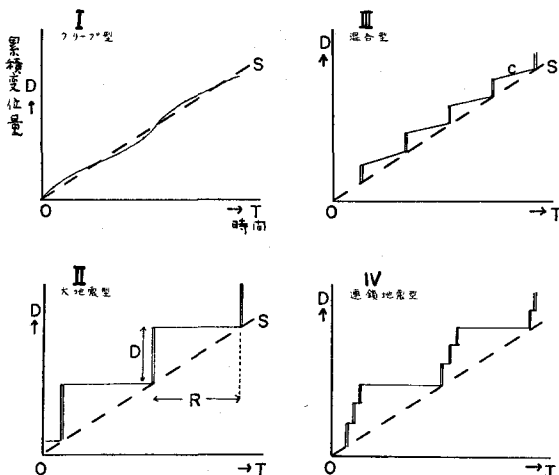
いずれも左ずれで、北東走向の断層は右ずれである。したがってこれらの地方ではほぼ東西水平方向に最大（圧縮）主応力軸、南北方向に最小主応力軸があるような広域的応力場が存在していると考えられる。東北地方では、ほぼ南北走向の逆断層系が発達し、やはり応力場の方位は、ほぼ東西方向に最大主応力軸があると推定される。第6図はこのようにして知られた日本島の地殻に存在する応力場の最大主応力軸の方向を示したものである。この地殻内最大主応力軸の方向は陸上でおこる浅発地震の主圧力軸の方向と一致しているばかりでなく、日本島沖合で発生した巨大地震のスリップベクトルの方向にもほぼ一致している。これらの応力場の成因はより大きな共通の原因（海洋プレート運動）に帰因していると思われる。

§. 6. 断層の動き方と地震の周期

各々の活断層は、最近地質時代からそれぞれほぼ一定の平均速度で同じ方向に動きつづけていることがわかったが、われわれの生活時間のスケールでみた時その平均速度でつねに動いているわけではない。第7図は同じ平均変位速度Sをもつ断層であってもI-IVのような色々な動き方があり得ることを示したものである。Iはクリープ型の断層の例である。この場合には、常時のクリープ速度Cと、地質学的に知れた長時間平均変位速度Sとほぼ同じであるから、大地震はこのような活断層からは発生しない。IIは常時は全く停止して、間欠的な地震の時の変位Dによってだけ変位を累積してゆくものである。死んでいるように見えるが大地震を発生するタイプの活断層である。IIIはIとIIの混合型であり、クリープと多発する小地震によって変位を累積してゆく型である。IVはIIの variability 型で周期的に地震を続発させる型である。

上記のうち、IとIIIはカリフォルニアでそのたしかな実例がしられている。日本の活断層は全部II（およびIV?）であるらしい。

この図からもわかるように、長時間平均変位速度Sと、地震発生周期Rとの間には次のような関係がある； $R = D / S - c$ 。Sは地質学的方法によって知りうる値であり、クリープ速度Cは実際に測



第7図 平均変位速度Sの活断層の動き方。

I：クリープ型，II：地震変位Dの繰返し型，III：クリープ（速度c）と地震変位との混合型，IV：IIの変り型。地震発生周期Rと発生する地震の規模はIIの型が最大。

第1表 二、三の活断層系の大震災発生周期

変位速度のタイプ	場所	地質時代の平均変位速度 (S) mm/年	"クリープ"の速度 (c) mm/年	最近の大震災の発生間隔 (D) 年	大地震発生時の変位 (D) m	大地震発生時の規模 (M)
I. (d)D	サンアンドレアス断層 (Pasadena ~ Parkfield間)	0.5	0.5	なし	大地震発生せず?	
	サンアンドレアス断層 (Chicoine ~ Camp Dix間)	0.5	0	1857	30フィート	700
	丹波断層	2	0	1930	2m	1000
	阿波断層	5	0	?	(5m*)	1000
II. (d=0)	中央構造線 (80km断層)	5-9	0	過去1000-1500年間なし	(5m*)	1000
	Wairau断層 (アルバイン断層系) の一断層	3.7	0	なし	10-20フィート	800-1600
地震頻度 d < 0	宮戸断層 (紀伊半島)	2	d = -0.8	1946 (M7.0), 1854 (M7.7), 1702 (M6.6), 1606 (M6.2), 1482 (M6.1), 1380 (M5.9)	1.2m	120
	南紀岩倉断層 (相模湾)	3.3	d = -0.8	1923 (M7.3), 1703 (M7.1), 1605 (M6.5)	1.85m	110
地震頻度 d < 0	モンテヴェルネ (アラカス海)		c = -7 mm/年	1964	10m	980 < R < 1350

M=8.0の場合の変位量。↑地震発生が記録されているものだけをのせた。

定可能な値であるから、断層ごとに地震時の変位量 D を仮定すればこの断層から発生するその D に応じた規模の地震の発生周期を求めることができる。第 1 表は二、三の活断層についてそれを求めたものである。日本の第 1 級の陸上の活断面は $c = 0$ であり、 S は 1000 年につき数 m で大地震時の変位 D はふつう数 m であるからそのような大地震の発生周期はおよそ 1000 年という見当になるのである。

その断層系から生ずる地震の規模にくらべて断層線が非常に長い場合には、1 回の地震で断層線の全部に変位を起こすことができず、数個の地震が位置をうつして続発することになる。(例、トルコのアナトリア断層系の最近 30 年間に続発した大地震群)。

南海道沖の大地震の場合には、その断層系が海底であったため、 D や S を直接明らかにし得ないが、断層近傍の陸地が変形しそれを海水面を基準として知りうるのでその量(隆起量)を D 、その場所での長期平均隆起速度を S 、常時の変動(沈降)速度を $-c$ とし、上式にあてはめることができる。室戸岬での各数値を入れると大地震の周期 R は約 120 年になり、歴史時代の地震発生間隔とほぼ一致する。関東地震に関しては c の値がよく決められていないので、これほどたしかにはわかっていない。

大地震の周期を求めるといことは、1 つの断層系では D がいつでもほぼ同じ値をとる(すなわち発生する地震の規模は断層系ごとにほぼきまっている)という考えを前提としている。地震現象は、前述したように、長い地質時代にわたり、しかも広域的に安定して存在する地殻応力の産物であると考えられるので、まず第 1 近似としてそのような事件発生 of 定常的な規則正しい繰返しを考えてもよいように思われる。

§ 7. 日本の活断層と地震

前節までで、活断層と地震の関係について述べたが、日本の活断層について要約すると次のようである。

第 2 表 日本の活断層系の地域的特徴。主な活断層系については第 3 表参照。

地 域	断層分布密度	主な断層系の型	代表的断層の変位速度
西南日本内帯	大	横ずれ断層	A (平均変位速度 1 ~ 10 mm/年)
東北日本内帯	小	逆断層	B (" 0.1 ~ 1 mm/年)
西南日本外帯	ほとんど 0	—	—
東北日本外帯	"	"	"
太平洋側沖合	?	逆断層	A ?

1) 活断層の分布や特徴には著しい地域性がある(第 2 表)。西南日本内帯とくに中部地方・近畿地方は、活断層の数が異常に多く(断層分布密度は世界最高?、第 8 図参照)、しかもそれらは大部分横ずれ断層であり、平均変位速度の最も大きい A 級活断層である。これに対して東北地方では、活断層は比較的少なく、それらは主に変位速度 B 級の逆断層である。西南日本・東北日本を通じて太平洋沿岸の地域には活断層は極めて少ない。しかし、これらの沖合海域には巨大な逆断層の存在が推定されている。

2) 日本の陸上にある代表的活断層は、平均変位速度が1~10mm/年(A級活断層)ないし0.1~1mm/年(B級)である。常時変位している活断層はないので、A級活断層はおよそ1000年に一度大地震を発生し数m変位すると推定される。

3) 将来の地震発生という点から注意すべき活断層は、大きな変位速度をもっていて、しかも歴史時代の数百年間現在まで大地震を発生していない活断層である。長い活断層系はそれだけ大規模な地震を発生するか、あるいはそれだけ頻繁に地震を発生する能力がある。日本の陸上の活断層でM8.5級の巨大地震を発生し得る長大で平均変位速度の大きな断層としては、中央構造線が筆頭である。

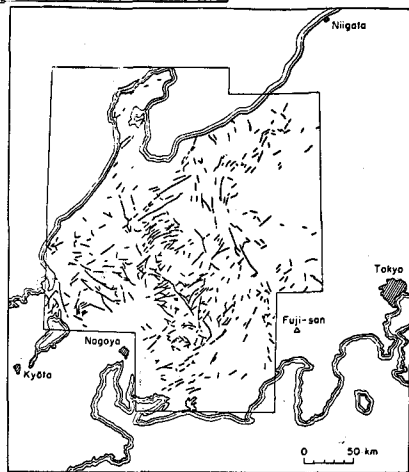
B級よりも低い変位速度をもつ活断層(C級活断層)は、それだけ地震発生の周期が長いと思われる。しかし歴史時代の大地震のうちにはC級活断層から発したものが少なくないし、またC級活断層は発見ないし確認しにくいので、C級活断層はA・B級活断層よりも数多く未発見のまま存在していると思われる。

以上

第3表 主な活断層と歴史時代の地震活動

活断層系		地震回数			地震年代分布						
位置(県)	名称	断層型	長さkm	活動度	M≥8	M≥7	M≥6	AD 500	1000	1500	2000
秋田	陸羽	逆断層	60	B		1	1				
岩手	盛岡西	〃	40	B		1					
福島	福島盆地西縁	〃	50	B			2				
〃	会津盆地西縁	〃	40	B			4				
新潟	長岡平野周辺	〃	30	B			2				
長野	善光寺平西縁	〃	70	B		2	2				
〃	糸魚川-静岡線	左ずれ	80+	A			1				
静岡	北伊豆	左ずれ	30	A		2					
富山	跡津川	右ずれ	60	A		1?	1				
岐阜	阿寺	左ずれ	70	A		1					
〃	根尾谷	左ずれ	70	A	1	1	2?				
愛知	深溝	逆断層	10+	C		1					
京都	丹後	左ずれ	20	C		1					
兵庫	六甲	逆断層	50	B			1				
〃	山崎	左ずれ	50	A		1?	1				
鳥取	鳥取	右ずれ	15	C		1	1				
(西日本)	中央構造線	右ずれ	800	A		3	3				
						1	2				
							3				

* A: 平均変位速度1~10mm/年, B: 全0.1~1mm/年, C: 0.1mm/年以下



第8図
中部地方の活断層