

1. 地震はなぜ起こる

北海道大学理学部教授 岡田 廣

1. はじめに

二十世紀の初め、ウェーゲナーは「大陸は移動する」という学説を発表した。しかしそれは、当時の地質学の常識をひっくり返す革新的な学説だったせいがあるいは学問的根拠が乏しかったせい、地質学者からまともに相手にされず、ただ嘲笑を浴びるだけで、やがて忘れ去られてしまった。

1950年代から盛んになった学問に岩石磁気学というのがある。火山が噴火するとき新しく地表に出てくる溶岩は冷え固まるまでに必ず磁石になる。それは何故だろうか？そんな謎を解明していった学問が岩石磁気学である。

この学問は1970年代になって地球科学の世界に「新しい地球観」を提唱した。その礎になったのが「海洋底は拡大する」という仮説である。この仮説によれば「大陸も移動する」。すなわちウェーゲナーの「大陸移動説」の復活であった。その後この仮説は、いろいろ研究が進められ、「プレート説」あるいは「プレート・テクトニクス」とか「ニュー・グローバル・テクトニクス」と呼ばれる新しい学説として定着し、現在は地球内部に起こるあらゆる現象を説明する拠り所となっている。

「地震はなぜ起こるか？」「火山はなぜ噴火するか？」など、1960年代まで長い間謎であったこれらの現象は「プレート説」で、完全ではないが、かなりよく説明できるようになった。

現在、「地震は地下の断層運動によって引き起こされる」という考えが定着している。すなわち「地震は地下に新しく断層ができることによって、あるいは既に地下にある断層が動くことによって起こる」というのである。もっと根元的には「地震はプレートが動くから起こる」ということになる。地震の発生は基本的にはプレートの動きに密接に関係している。

古い岩石に残されている磁気、それはわれわれに「かつてプレートが動いた」ことを教えてくれた。しかし「今もプレートは動いているのか？」という問いには答えてくれない。その問いに答えてくれるのは、実は地震なのである。確かに、地震の起こり方を知ることによってプレートの動き方を知ることができるようになった。また逆に、プレートの動き方を知ることによって、地震の起こり方も知ることができるようになった。

2. 地震はどこで起こるか？

(1) 世界の地震活動の分布

現在世界の地震観測網によれば、マグニチュード（地震の大きさを表す単位で、観測された地震波の最大振幅を使って決める。地震波にはいろいろな種類があるので、どの波を使って決めたかによってその大きさが異なる。たいていは、S波か表面波と呼ばれる波で決める。これを記号Mで表す）5以上の地震ならば世界のど

こに起こっても震源（最初に地震の波が出たところを言う。その真上の地表の点を「震央」と言う）が求まる。日本、アメリカなどのように、数多くの地震観測点が密に分布するところではM4以上、場所によっては、M2程度以下でも震源が求まる

地震は世界中に一様に起こるのではなく、特定の場所に起こる。その深さは場所によって異なるが、浅い地表付近から約700キロメートルに及ぶ。何故か700キロメートルより深いところには起こらない。

いま深さ60キロメートルより浅いところに注目し、そこに起こる全世界の地震の震央分布（これを地震活動と呼んだりする）を図1に示

す。地震の発生する主な地域は

- ・島弧およびそれに準ずる地域、
 - ・中央海嶺およびその内陸部への延長にあたる地溝帯、
 - ・大陸の一部（中国、北米中東部など）、
- などである。

一方、地震のほとんど発生しない地域すなわち地震活動の低い地域としては、海嶺やハワイの火山島付近を除く大洋底の大部分、および大陸のいわゆるシールド地域、たとえばカナダ、グリーンランド、北欧、アフリカ西部、アラビア、オーストラリア、ブラジル、南極大陸などである。

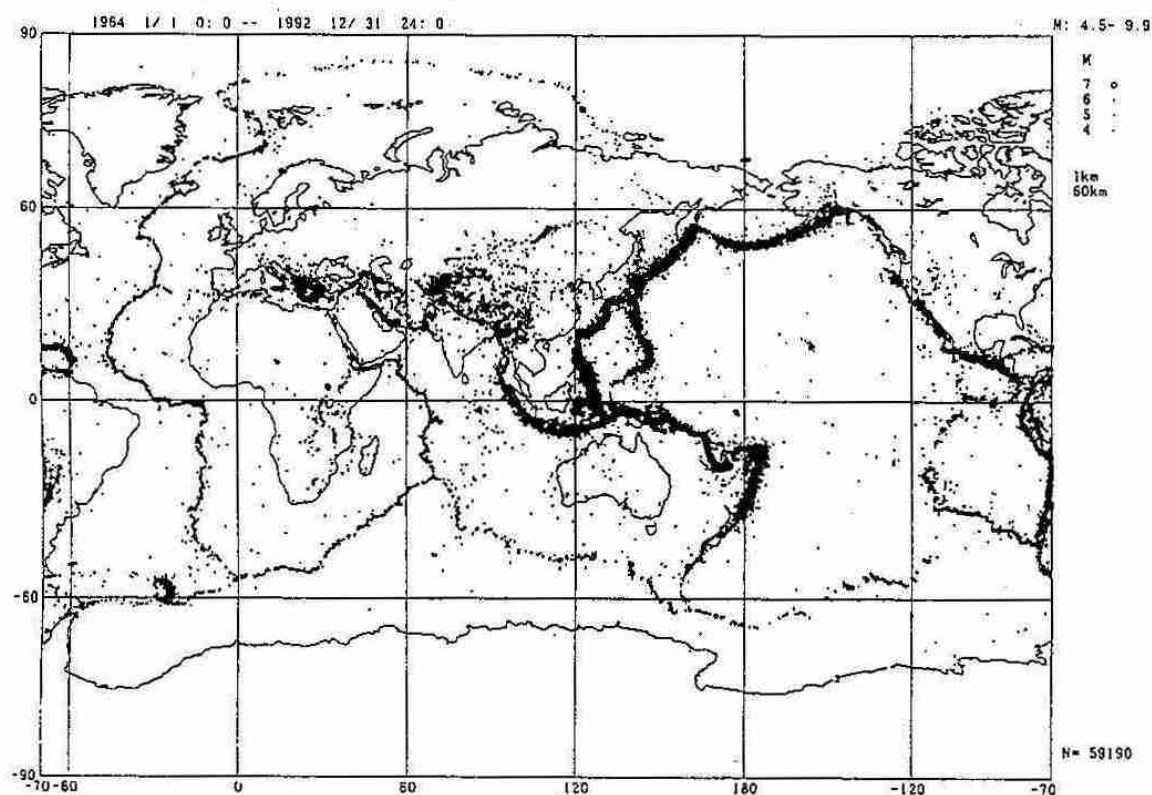


図1 全世界の地震の分布（1964年～1992年）

(2) 日本とその周辺の地震活動

最近約10年間、日本とその周辺に起こった深さ30kmより浅いM2以上の地震の震央分布は図2のようになる。これには総数約34000個が記されている。地震活動の活発なところは、

- ・北海道、東北、関東地方の太平洋岸と海溝の間、
 - ・東海道から四国の沖合、南海トラフの内側、
 - ・北海道、東北地方の日本海岸、
 - ・本州中部以西の内陸、
- などである。

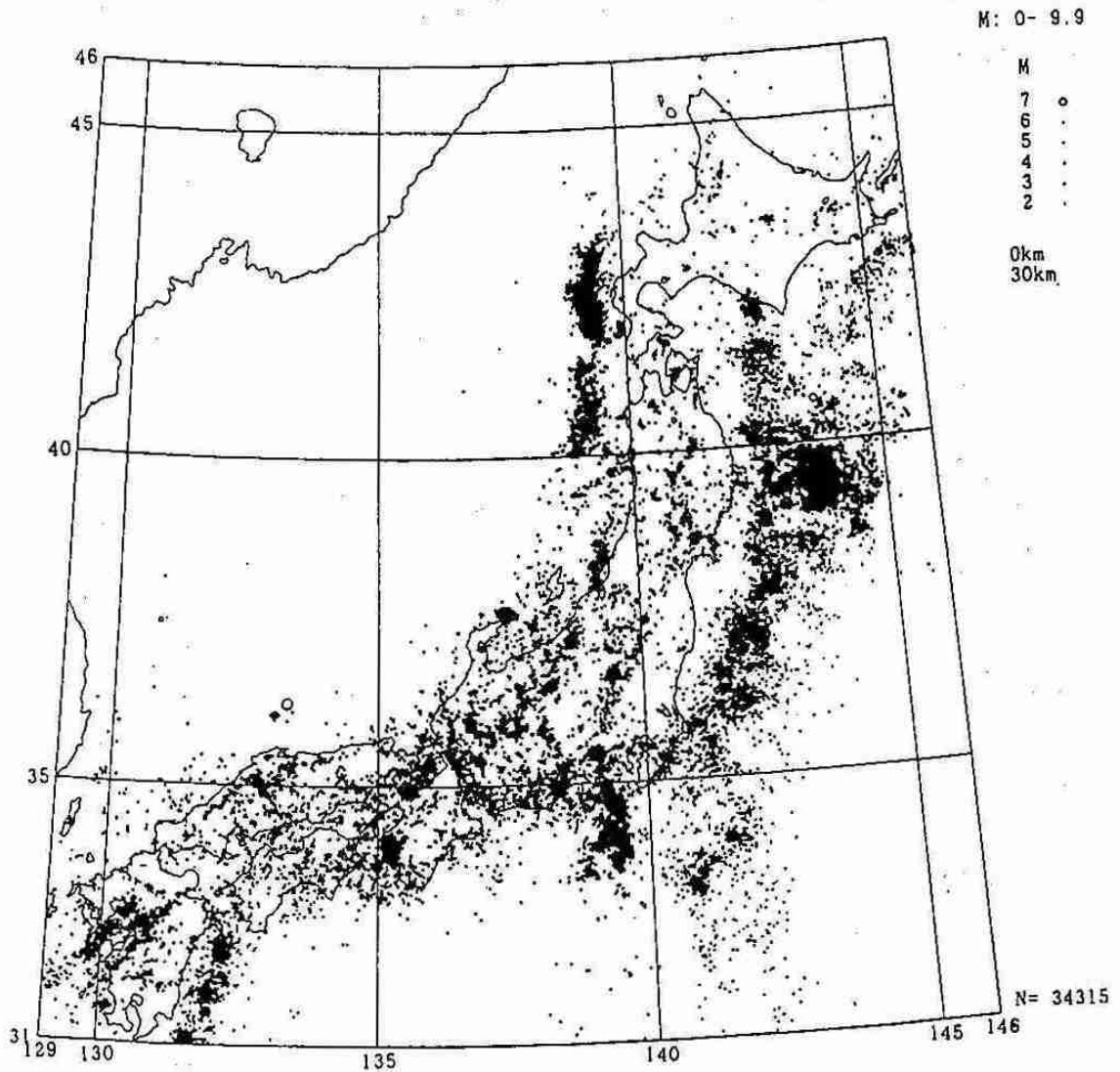


図2 日本とその周辺の地震の分布 (1983年~1992年)

(3) 北海道とその周辺の地震活動

北海道とその周辺で、最近約19年間に起こった深さ40kmより浅いM1以上の地震の震央分布を図3に示す。M1程度の小さい地震になるとどの場所でも同じ精度で震源の位置を決めることはできない。そのためにMの小さい地震の分布にはややむらがある。この図の地震は総数約42000個ある。主な活動域は、

- ・日高山脈西側から浦河沖の太平洋岸、
 - ・釧路沖および根室沖の太平洋岸、
 - ・北海道北部稚内から石狩北部にかけての内陸、
- であるが、これには、1982年3月21日浦河沖地震、1993年7月12日北海道南西沖地震、1994年10月4日北海道東方沖地震、1994年12月28日三陸はるか沖地震などの余震が含まれている。

(4) 札幌とその周辺の地震活動

最近約19年間に、札幌とその周辺に起こった

地震の中、深さ40kmより浅いM1以上の地震だけに注目する(図4)。

小さい地震がほとんど深さ約20km未満に起こっている。図ではいろいろなところにバラバラに起こっているように見える。これは、観測点の数が少なく、震源位置の決め方が、あまり良くなかったせいで、もし札幌周辺にもっと多くの観測点があり、今より震源位置の決め方が良ければ、これらの震央はおそらく線状に分布しただろう。この図では、

- ・石狩川河口から札幌市を通り支笏湖周辺にいたる幅約50kmの地域、
 - ・石狩湾北西の積丹半島沖合い、
 - ・石狩川上流の西側、
 - ・石狩平野の東縁すなわち日高山脈の西側、
- などで比較的多く地震が起こっているように見える。

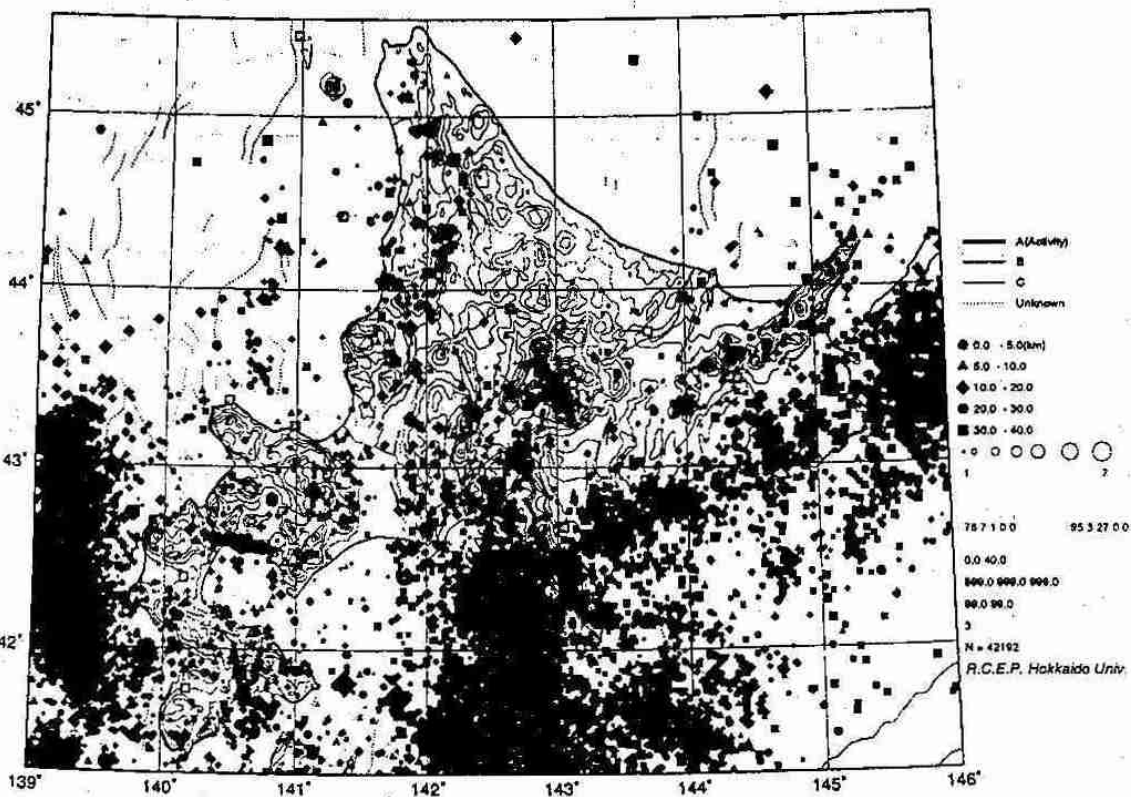


図3 北海道とその周辺の地震の分布(1976年~1995年)(北海道大学理学部地震予知観測地域センターによる)

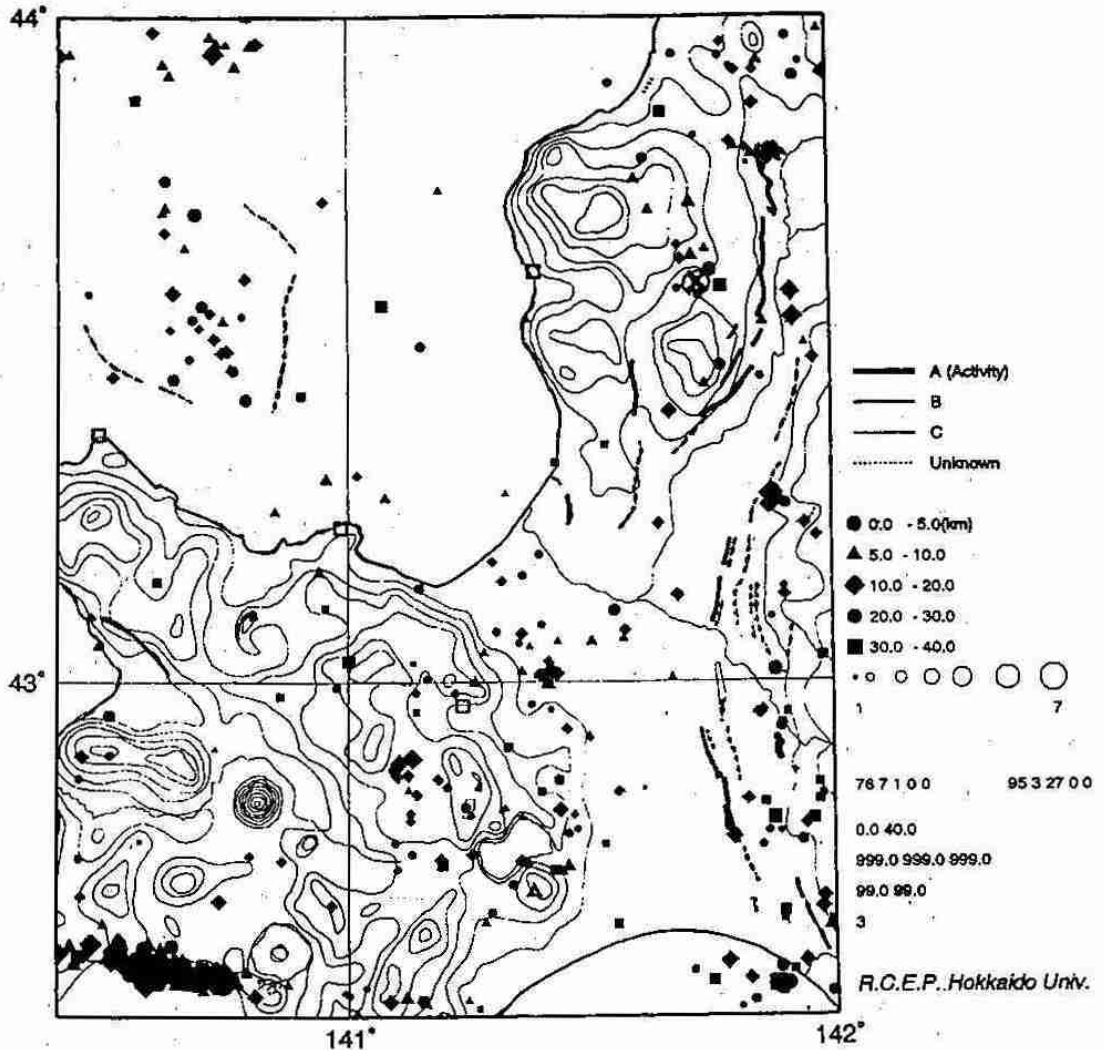


図4 札幌とその周辺の地震の分布 (1976年~1995年) (北海道大学理学部地震予知観測地域センターによる)

(5) 地震活動の空間分布で分かること

いろいろなスケールで地震の震央分布を見てきたが、いずれの場合も、地震が密に分布しているところ(「密集地域」と呼ぶことにする)は、地球の長い歴史の中でくり返しくり返し地震が起こっていたところで、地震の「常時発生地域」になっている。これからも地震が起こるとすれば、この地震の「密集地域」あるいは「常時発生地域」のどこかに起こることになる。そしてこれから先、長い将来にわたって、地球のこのような地震の分布はわれわれが知った模様のままで変わることはないだろう。

このように、われわれは1950年代以降、「地

震はきまったところに繰り返し起こる」ことを知った。

今までの経験によると、過去発生したことが知られていないところに不意に地震の起こるがある。このような地震も、後で調べてみると、結局周辺の地震活動の隙間を埋めるように起こるべくして起こっている。

なお、地震の密集地域ないしその周辺で過去地震の発生の歴史がないところ、また過去発生の歴史があっても、地震がそこに長い間起こっていないところ、これを地震の「空白域」と呼んでいる。

世界の地震活動、日本の地震活動、そして北

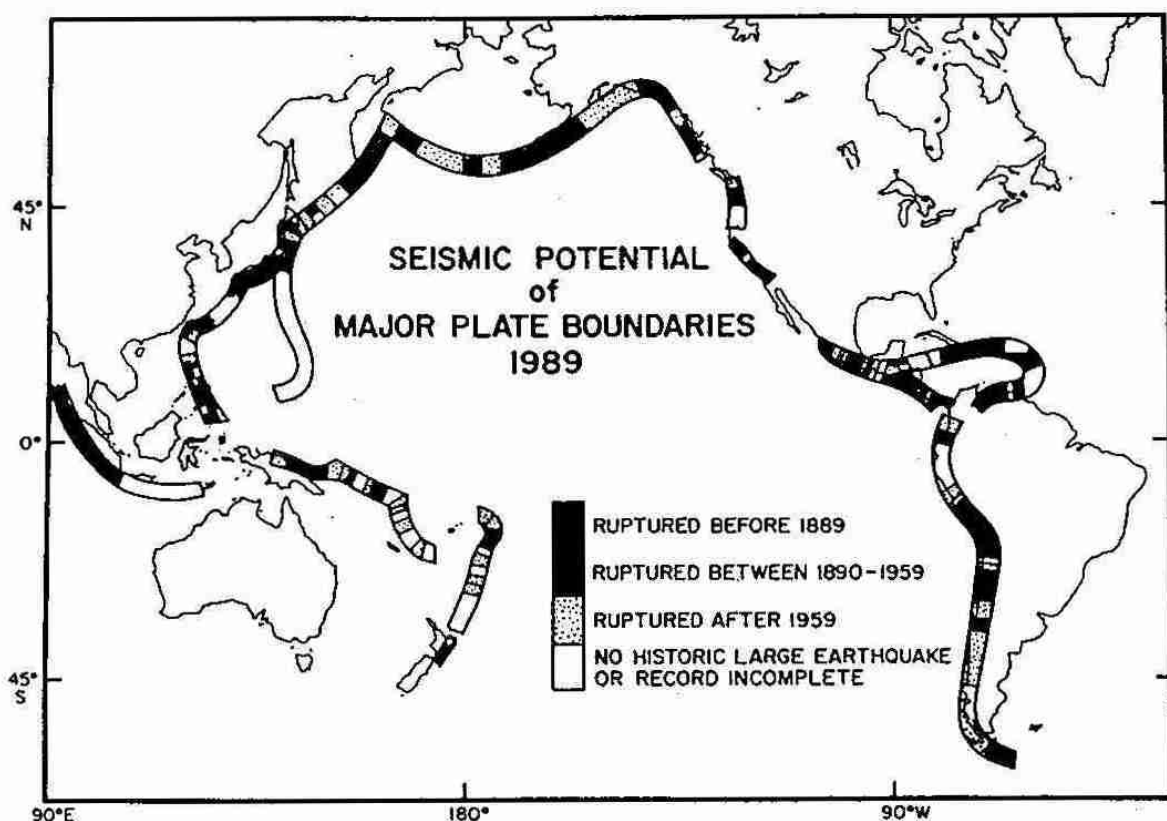


図5 環太平洋の地震の空白域と大地震の発生の可能性の高いところ (C. H. ショルトによる)

海道とその周辺の地震活動を見て分かるように、地球には明らかに地震の「密集地域」がある。そういう密集地域の中で、あるところがある時期から地震活動が低くなったとしたら、そこはやがて起こるであろう地震の空白域と考えるべきだろう。

環太平洋の地震帯について、空白域を調べたのが図5である。

今まで地震の起こった位置を「点」で示していたが、実際に地震が起こった場合そこは「点」ではなく、ある広がりをもっている。これは地震の起こり方あるいは地震の原因に関係がある。

3. 地震はどのようにして起こるか？

地震は人間にとって最も恐ろしい自然現象の一つである。「地震は何故起こるのか？」誰し

もその原因を知りたいと思っている。かつてはそれに関わる信仰、神話が数々現れ、その主役として、なまず、牛、蛇などが登場した。いまそれを真面目に取り上げる人はほとんどいないだろう。たかだか百年の歴史しかない「地震学」という学問を振り返ってみると、地震学者達は、地震の原因について「地下深くマグマが貫入するため」とか「地殻内の断層付近にたまった歪みを解消するように断層がずれ動くため」とか、いろいろ理屈をひねった。前者を「岩しょう貫入説」、後者を「弾性反発説」と呼ぶ。これらの説も日本の数々の優れた研究によってやがて表舞台から消え去っていく。その口火を切ったのが、1917年の志田順の重要な発見「P波初動方向の規則的な分布」である。

(1) 初動の押し・引きの空間分布

地震が起こると、震源からは、地中の粒子を進行方向に沿って前後に動かすようにして伝わる「P波」と、同じく粒子を進行方向に垂直な面内で動かすようにして伝わる「S波」の2種類の地震波が出てくる。どちらの波も地球の外へ逃げ出せないために、時にはそのエネルギーが地表付近にたまり、新しい波、「表面波」が2次的に出来たりする。これらの波の伝わる速度はP波が最も大きく、次いでS波、そして表面波である。したがって地震が起これば、どの場所にも最初にP波が到着する。その時、地面の最初の動きは震源から遠ざかる向き（押し）か、震源に近づく向き（引き）かのいずれかになる。志田順（1917）は初動の「押し」と「引き」の空間分布を調べ、それには規則的な分布のあることを発見した。そのような規則的なP波の初動分布が得られている1948年福井地震の例を図6に示す。

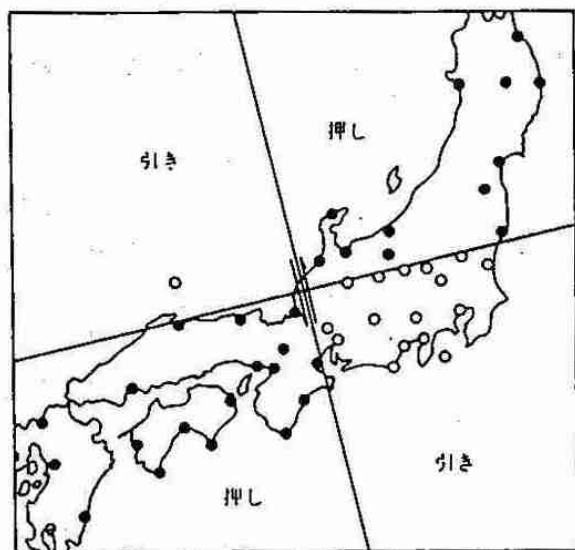


図6 1948年福井地震のP波初動分布

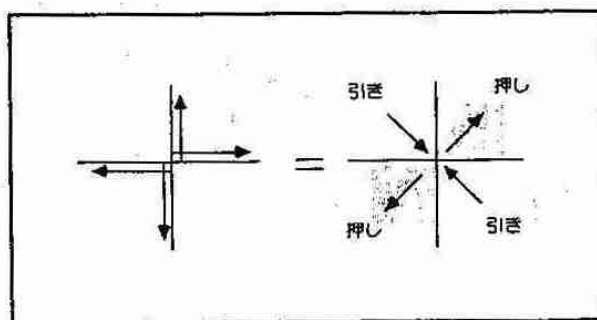


図7 震源に作用する2組の偶力と初動の「押し」「引き」の分布

1950年代になって、この現象は、地震の起こるところに図7のように、

互いに直交する2組の偶力が作用

していたために起こることが分かった。一般に物体は、特定のところに集中的に長時間続けてこのような偶力が作用すれば、壊れてしまう。地下深部の岩石にも同じように偶力が長時間作用し続けると、そこは壊れるだろう。その壊れ方は

互いに直交して作用する2組の偶力の
どちらかに沿って割れる

はずである。このようにして出来る割れ目を断層と呼ぶ。しかし、このような断層が地表に現れることは滅多にない。その滅多にない断層を1891年濃尾地震で見ることが出来た（図8）。有名な根尾谷断層である。今は天然記念物に指定されている。この地震は、仙台以北を除く本州、四国、九州、種子島まで、日本列島のほとんど有感という大きなものだった。そのために、人々はその断層は地震があまりにもものすごく地面を揺すったために出来たと考えた。すなわち「断層は地震の結果」と考えた。

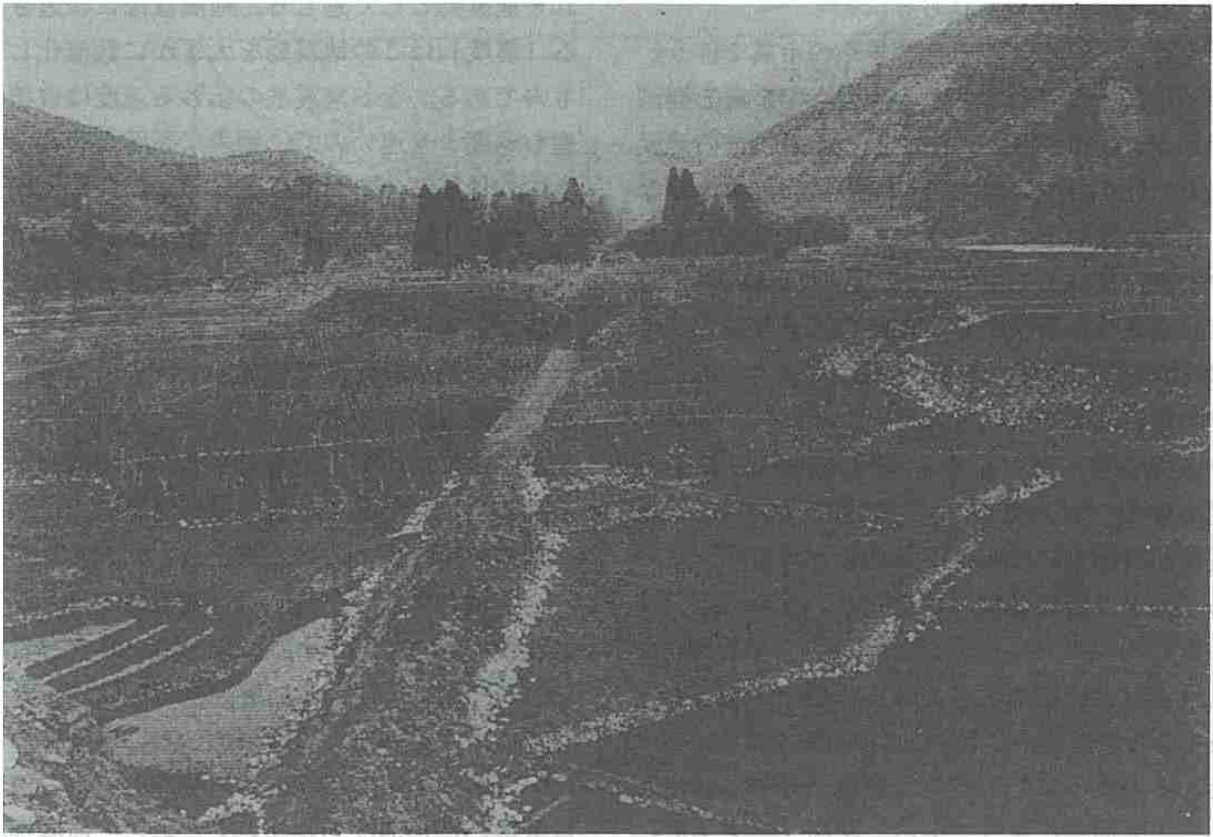
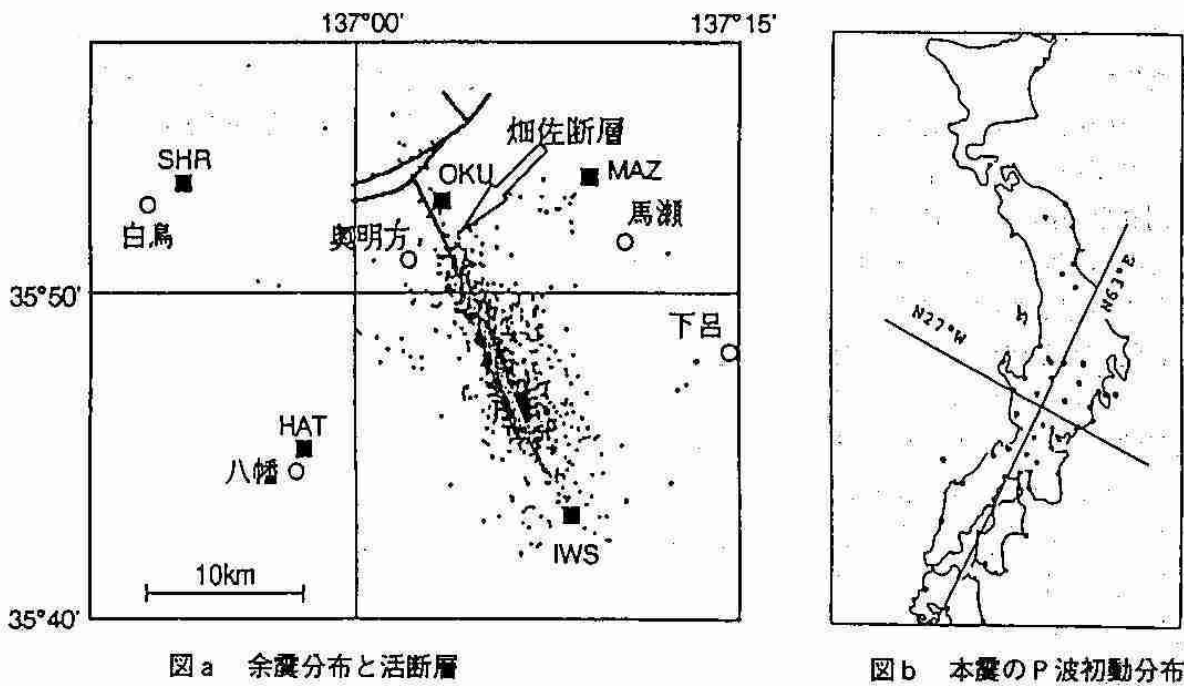


図8 1891年濃尾地震による根尾谷断層の一部 (瀬古安太郎氏撮影)



図a 余震分布と活断層

図b 本震のP波初動分布

図9 1969年岐阜県中部地震の余震分布

(2) 地震は断層運動である

地震はたいていの場合数多くの余震を伴う。1960年代になると、多くの観測点で余震を観測できるようになり、地中を伝わる地震波の速度もよく分かってきたために、余震の位置をかなり正確に決めることが出来るようになった。その結果、従来の地震と断層の因果関係の考え方を一変させる事実が見つかった。それは1969年の岐阜県中部地震のときである。たくさん起こった余震の位置を決めてみると、それらは見事に一直線に並んだ(図9)。そして地表に断層を見つけることもできた。この事実により、「地震は断層運動によって引き起こされる」すなわち「地震は断層運動の結果」という考えが定着した。

最近では、比較的大きな地震の場合、余震の分布をさらに詳しく捉えることが出来るようになった。そのようにして捉えた余震の分布は線状というより面状になっている。結局、断層運動によって出来る断層は平面的な広がりを持つことが分かってきた。故に「断層」は「断層面」と言う方が正しいかもしれない。図10に示す1989年アメリカのロムプリータの地震などはその典型的な例である。

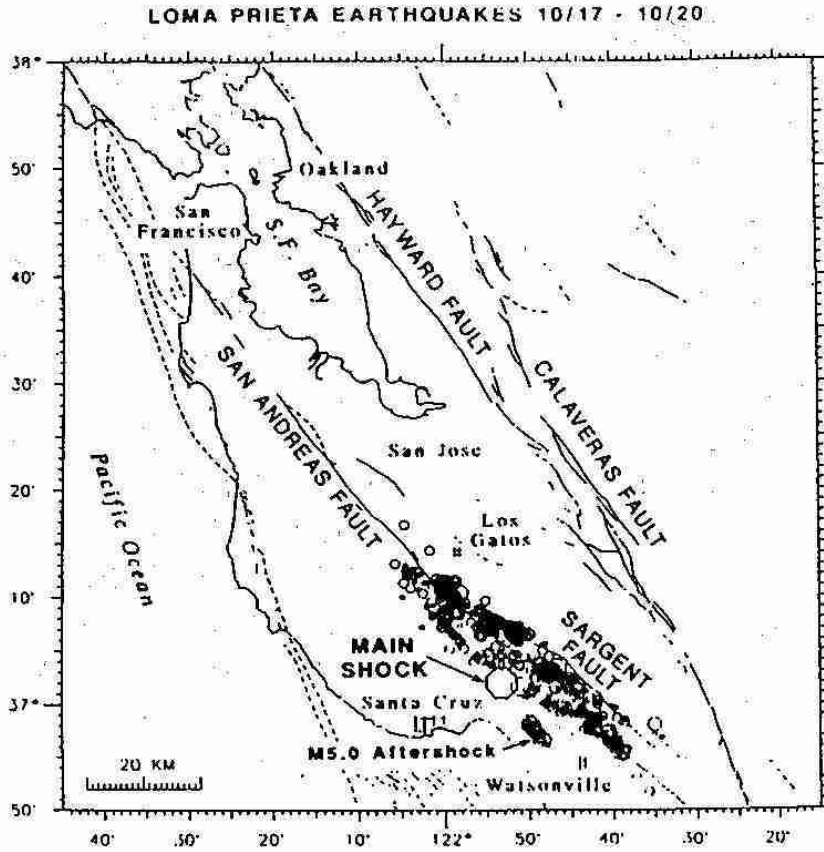
その断層面は一瞬にして出来上がるものではない。まず初めに、地下のどこかのある点に小さな割れ目が出来、そこにくいちがいが生じ、そのくいちがいが、毎秒3000メートルから4000メートルの速さで四方に広がって行く。最終的には岩盤がある広がりをもった平面を境にしてその両側に互いにずれを残して止まる。そのずれた痕跡を「断層」といい、その平面を「断層面」という。そのような割れ目の出来るとき、すなわち岩盤の壊れるときの衝撃が弾性波すなわち地震波として伝わる。つまり断層は、最初の割れ目から最終的に岩盤のずれが止まるまで、断層面内のいたるところから四方八方に波を出し続けながら壊れていく。

これらの波が地表に達すると、われわれはそ

れを地震動として感じる。地震直後に報道される「震度」はこの地震動を大まかに数値化したものである。なお地震波の伝わる速度は破壊の進む速度より速いので、地表に断層が現れるときでも地震波の方が必ず先に来る。

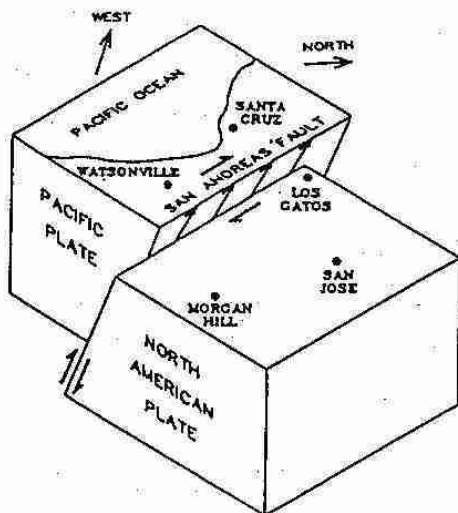
このように、断層は絶えず地震波出しながら、次第に周辺に広がる破壊によって形成される。断層が大きければ大きいほど、次々と送り出される波が重なりあって地震動は大きくなり、揺れの時間も長くなる。

ここまでは1個の地震を1つの点で表し、その点の集まりとして地震活動を見てきた。しかし地震を点で表すのは、何となくわれわれが抱くある種の大きさを持った「地震のイメージ」とはかけ離れているように感じる。事実、これら点の位置はいずれも断層運動の開始点であって、広がりを持った断層のあるところ全体ではない。上に述べたように「地震波の伝わる速度は破壊の進む速度より速い」ために、断層運動の開始点つまり断層面で最初に破壊したところから出た波を真っ先に記録することになり、地震の位置は、その波の到着時すなわち初動の到着時を使ってただ点として求められる。したがって今まで、地震はその大小に関わらず、そしてそれを引き起こした断層の広がりや形とは無関係に1点で表していた。



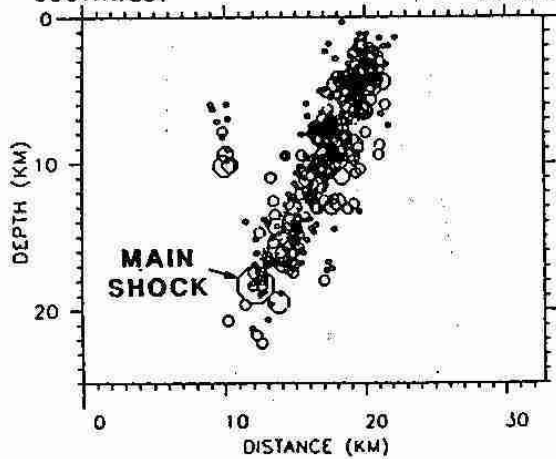
ロマプリータ地震の余震分布

SCHEMATIC DIAGRAM OF THE EARTHQUAKE MECHANISM



断層ずれの概念図

CROSS SECTION OF LOMA PRIETA EARTHQUAKES VIEWED FROM THE SOUTHEAST



断層直角断面の余震分布

図10 1989年ロマプリータ地震とその余震の分布

最近、断層面を形成する破壊の進行状況も刻々捉えることも出来るようになってきた。その一例が図11である。断層の形を矩形と仮定したり、その他まだいくつか仮定しての断層形成モデルであるが、これによって観測された現象の大部分をうまく説明できるようになったことは確かである。これとは大きく違った断層モデルとして、北海道南西沖地震がある(図12)。この地震の場合、断層は少なくとも5面できたと考えられる。この例のように、最近、大きな地震は1枚の断層面で説明することは困難であると考えられるようになった。

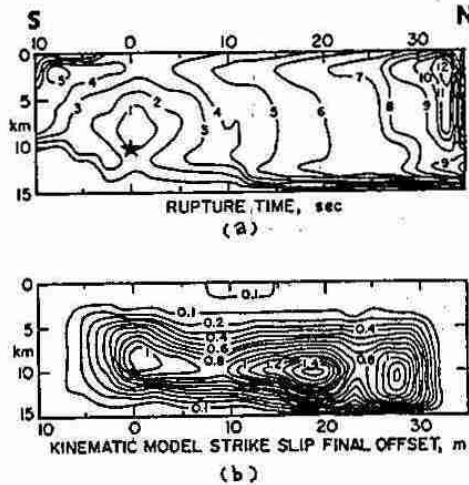


図11 インベリアルバレー地震の断層とその出来方。(a)破壊の進む時間分布、単位は秒。(b)断層面内に残ったずれの大きさ分布、単位はcm(C.H.ショルツによる)

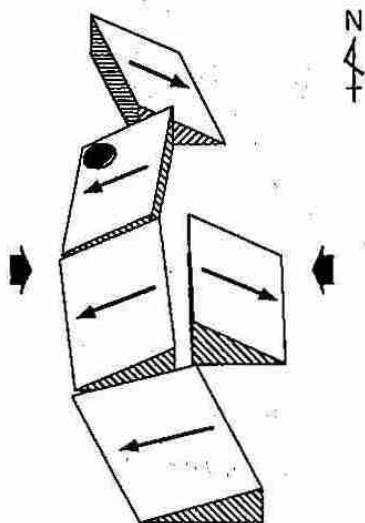


図12 1993年北海道南西沖地震の断層(北海道大学理学部地震予知観測地域センターによる)

上に述べたように、地震は、地下のどこかのある点に小さな割れ目の発生で始まり、そこに生じたくいちがいが四方に広がり、最終的に岩盤のずれが停止すると終わる。しかしこのように短時間で引き裂かれた岩盤のずれは余りにも速く出来上がるために、決して「おさまり」はよくない。大急ぎで引き裂いたために細かいところでやり残したところもあるだろうし、勢い余って余計なところまで引き裂いたかもしれない。地震直後、かなり長い時間かかって、このような断層面各所に残る「割れ残し」の破壊や「割れ過ぎ」の「補修」のようなことが断層の中で起こる。つまり「断層の仕上げ」である。またこの断層周辺に少なからず影響が及び、その断層周辺をかるうじて支えていた力の場が崩れ、その煽りで周辺部分にも小さな破壊が起こる。このような「断層の仕上げ」や「周辺部分の小破壊」、これが余震である。したがって余震の分布を調べると、地震によって出来た断層の形や広がり鮮明に浮かび上がってくる。このような「余震分布が断層の輪郭を描きあげるとい現象」の発見も「地震はなぜ起こるか?」の謎解明に大いに役立った。

被害を起こすほどの大地震ではないが、実際に地表で断層の観察されるところで起こる地震は、まさにその断層の輪郭を描くように起こる。図13の西日本の地震活動図にその様子を見ることが出来る。

あるところで今、小さいながらも地震が起こっていると。このような地震はその場所か直ぐその側にかつて起こった大きな地震の余震か、もしくは現に断層が小刻みに動いている証拠かもしれない。少なくとも地震が起こっているところがあれば、そこには必ず断層があり、その断層は今も動いていることを証明しているようなものである。そのような断層を活断層と呼んでいる。

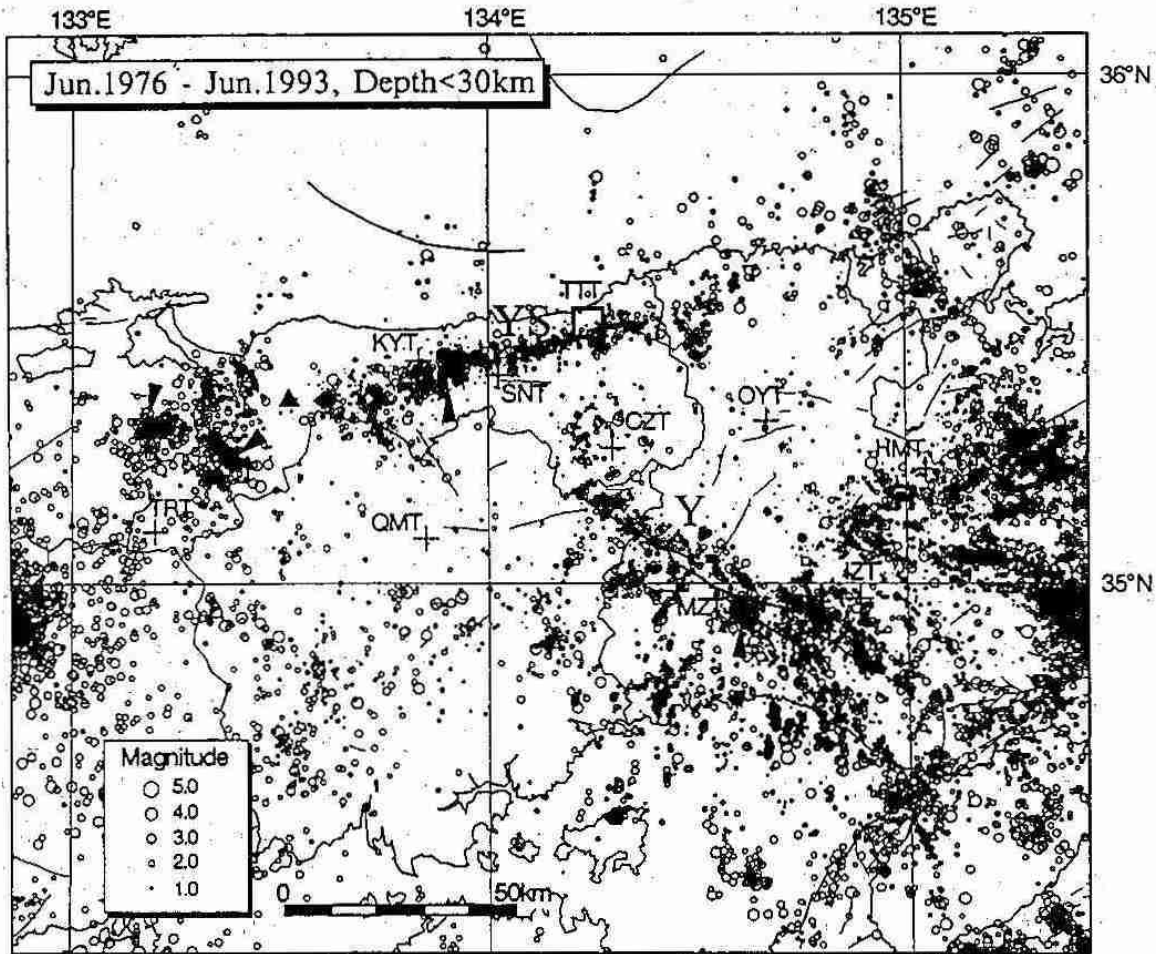


図13 西日本の深さ30km未満の地震活動の断層 (1976年~1993年) (京都大学防災研究所による)

4. 活断層とは何か?

(1) 活断層はどうしてできるか?

「活断層」とは、最近の地質時代(200万年以降)に繰り返し活動したことが明らかな(地形に変動を刻む)故に、将来も活動して地震を発生させる可能性のある断層のことを言う。

もともと、活断層を含め断層はどうして出来たのだろうか?

地球の中には、地球の表層厚さ約100キロメ

ートルまでを構成する十数枚のプレートという固い岩盤を動かす力や、それらのプレートが動くことによって二次的に生じる力が絶えず働いている。地震学では、このような力を「ストレス」という「単位面積に加わる力」に置き換えて使う。このストレスが生じるのは、地球の中が不均質な物質で出来ているからである。物質が不均質なところは、ストレスを生み出すところとなる一方で、また特別な大きなストレスが

加わるところとなる。その代表的なところが、プレートの表面、ちょうど地球の皮にあたる「地殻」である。地殻は地球の中でも最も不均質な構造のところ、ストレスのかかり具合が最も激しいところである。そのようなストレスの働き方は、不均質な地殻の中では当然むらがある。あるところは強くあるところは弱かったりする。長時間このように場所によってむらのあるストレスが作用し続け、耐えきれなくなったところにやがて破壊が起こる。この地殻内で起こる破壊現象を断層運動という。

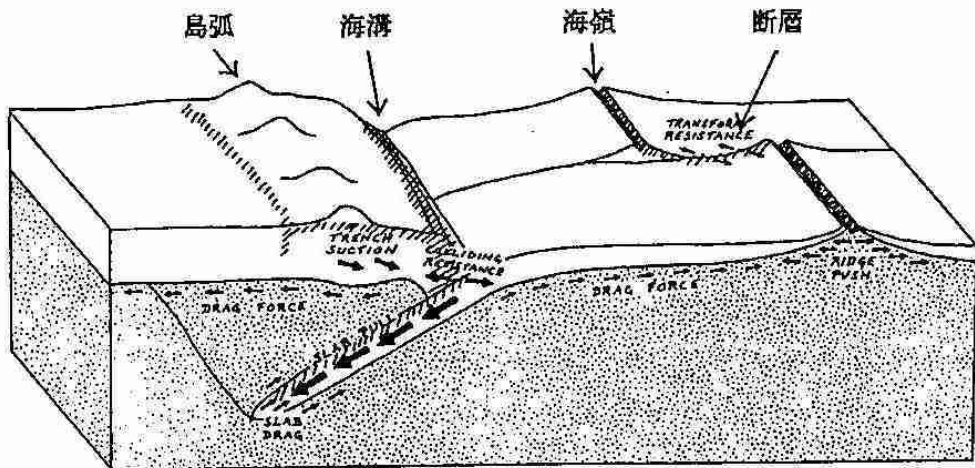
このようにして出来た断層は地下にいくちがいを残したまま、時間とともにやがて古傷となっていく。古傷となった断層は地殻の弱いところとなる。絶えず作用し続けるストレスは、またこの古傷を痛めつける。断層は再び動かざるを得ない。また活断層となる。何回も何回もそのようなことを繰り返して、断層は大きくなったり、形を変えたりしていく。

上に述べたように、プレートは絶えず動いている。やがて行き場のなくなったプレートは地下にもぐらざるを得ない。そこにはどうしても無理が働き、地下のストレスは大いに高まり、大きな断層をつくることになる(図14)。時間

が経つと、プレートは地下の更に下にもぐり込んでいく。そのプレートは当然その周りの物質とは性質が異なる。プレートのもぐり込んだところは不均質な構造となる。そのために深いところでも、プレートがもぐり込んでいく限り、地震が起こる。またむりやりもぐり込むプレートは自分自身にも無理がかかるが、その周辺にもいろいろ無理を強いることになる。そのあおりを世界のどこより強く受けているところが日本列島である。日本列島の地殻は古傷だらけである。

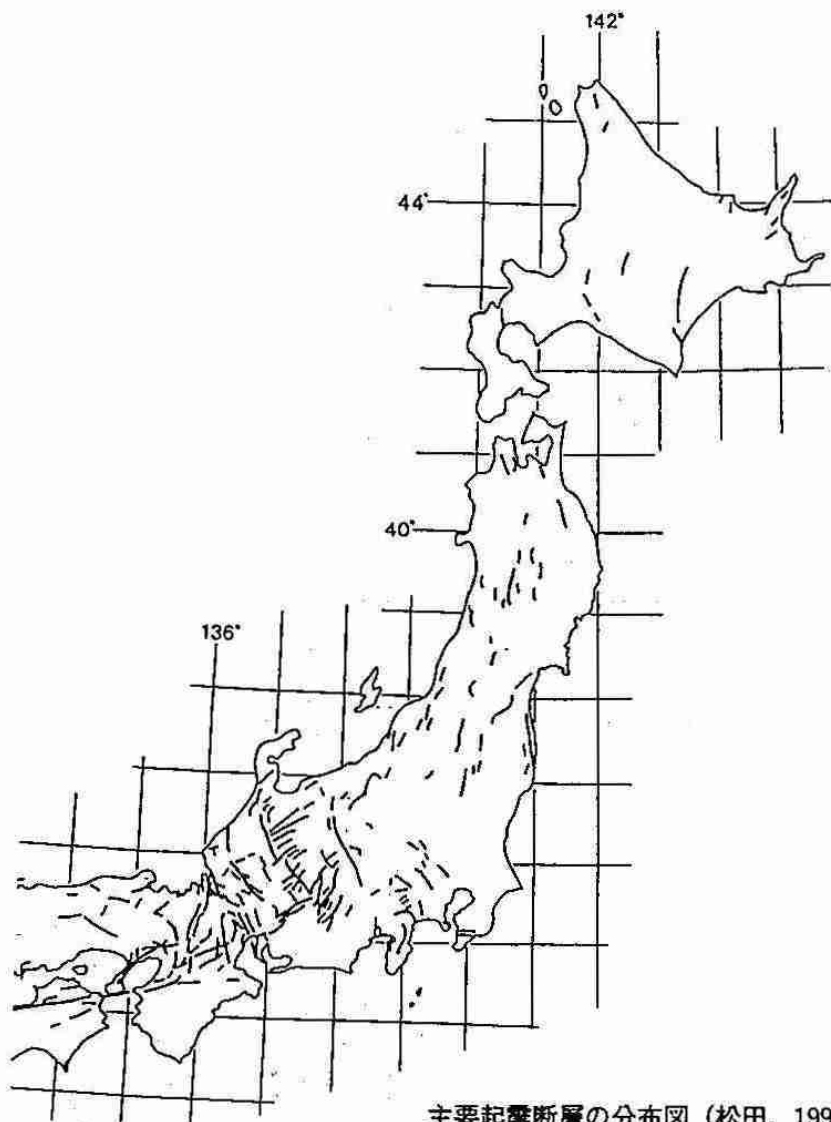
(2) 活断層はどこにあるか？

日本列島の活断層をしてみる(図15)。これは主に地震を起こす可能性の高い断層だけを記したものである。断層はこのほかにもまだまだあると考えられている。これより増えることはあっても減ることはない。またここに記されていない断層が地震を起こすことだってあり得る。断層の長さは今後起こるであろう地震の大きさ(マグニチュード)に関係しているだろうといわれている。北海道については、もう少し慎重な目で断層の存在を見てみよう。



//////
強いストレスのかかるところ、すなわち活断層の出来るところ

図14 活断層の出来るところ



主要起震断層の分布図 (松田, 1990より)

図15 日本列島の主な活断層の分布 (松田, 1990)

(3) 北海道の活断層

北海道には、大きく分けて7つの活断層密集地帯がある (図16)。西から東に向かって、①黒松内低地-函館西縁帯、②石狩平野西縁-東縁帯、③天塩-苫前帯、④富良野盆地地帯、⑤十勝平野東縁帯、⑥網走帯、⑦知床半島帯などである。これらの地域に見られる断層のほとんどは航空写真で見つけられたものである。断層の活動度もそれぞれ判定されている。幸い

と言うべきか、かえって危険が高まっていると言うべきか、これらの断層で大きな地震を起こしたものは知られていない。ここで断層の起こり方についての説明は省略するが、ちなみに北海道の断層は、動くとなれば、正断層か、逆断層で、どちらかというとな上下にずれるタイプである。兵庫県南部地震のような横ずれタイプとは異なる。

断層は陸だけとは限らない。海にも非常にた

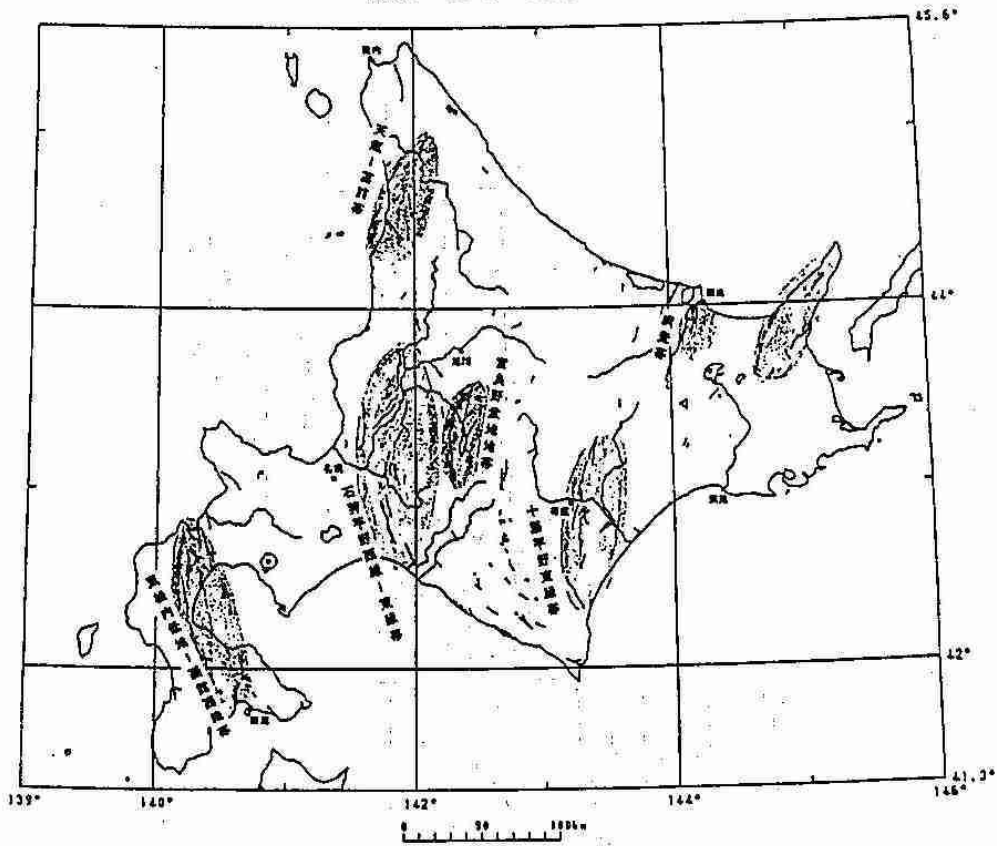


図16 北海道内陸部の活断層の分布 (山岸,)

20 札幌

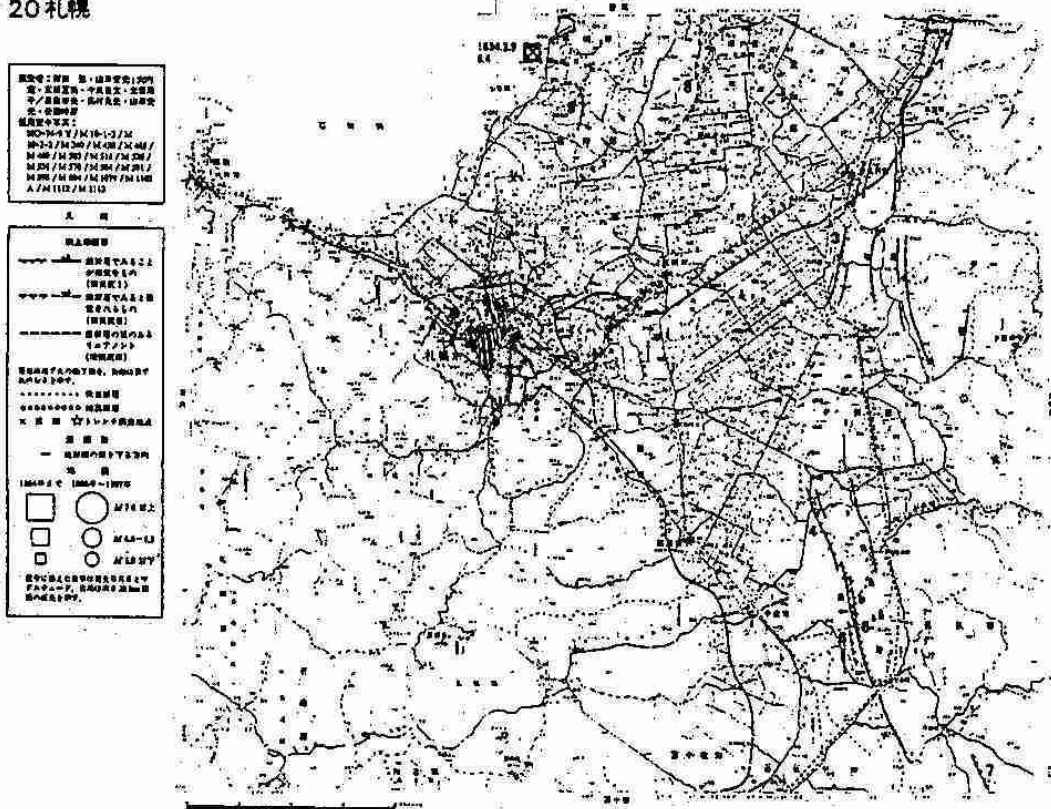


図17 札幌周辺の活断層 (日本の活断層,)

くさんある。陸よりむしろ海の方が多。

(4) 札幌周辺の活断層

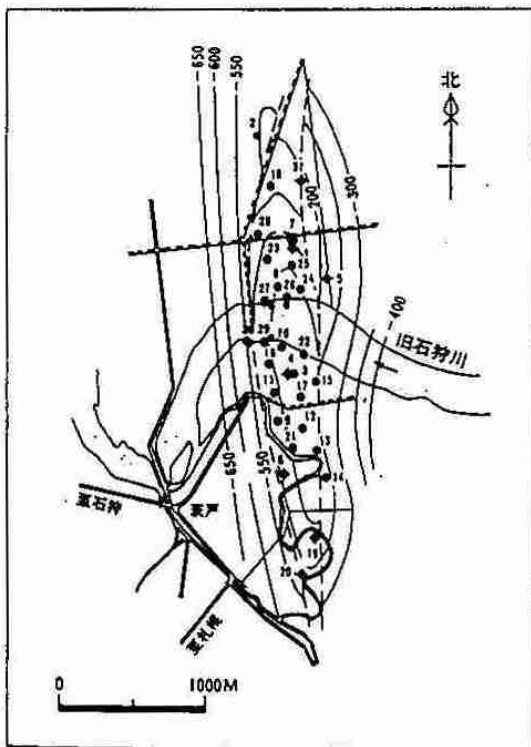
札幌とその周辺にも活断層はある(図17)。この図では、札幌市の下には断層は見当たらない。「まずは一安心」と思うかもしれない。しかしそうはいかない。札幌市を中心とする石狩平野は、石狩川が長い年月をかけて上流から運んできた厚い堆積物で被われている。活断層はあるいはこの堆積物でかくされているのかもしれない。そんな疑いを抱かせる資料がある。(図18)。

石狩川河口付近でかつて石油探査が盛んに行われ、その地下構造が明らかにされた。丁度

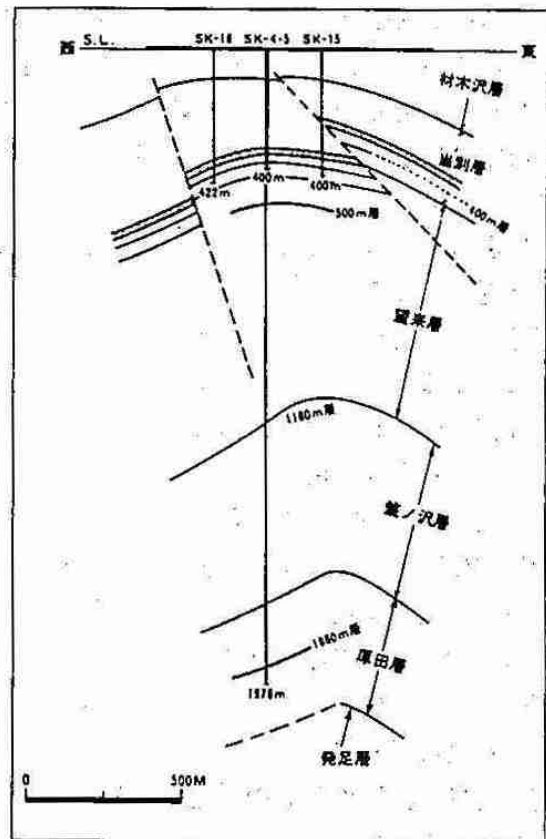
樺戸山系に見つけられている断層の南へ延長したところである。明らかに断層がある。このように現在地表では見えない断層が地下にまだまだ多く存在している可能性がある。滅多に動かないこれらの断層がもし動いたら活断層かもしれない。それらが今後絶対に動かないという保証はない。目で見える断層だけでなく、地下に隠れた断層を探し、それが果たして活断層かどうか、今後地道に調べていく必要がある。

(5) 活断層はどうして探る？

地表に姿を表している断層を丹念に調べること、これは断層調査の第一歩である。しかし目に見えない断層もたくさんあり、それが非常に



茨戸油田地下構造図



茨戸油田横断面図

図18 茨戸における石油探査で得られた地下構造 (石油資源開発株)

危険なことも十分あり得る。見えない断層はどうして探るか？それには、石油探査のような精密な地下構造調査、深井戸による調査、実際に地下を掘るトレンチ調査などがある。

また、それらの断層が現在もそしてこれからも地震を引き起こすような活動的なものかどうか絶えず観察していく必要がある。それには、今よりもっと密な地震観測網を展開し、小さな地震までも震源を特定できるようにしていくことが大切である。

断層を探るにも、またそれが活動的かどうかを知るにも、膨大な経費を要することはまちがいない。それでも、大地震の後の被害の大きさや失われる人命の尊さを思うと、このような経費はそれほど高いものではないはずだが？

5. おわりに

「地震はなぜ起こる」ということについて、いろいろ述べてきたが、一言でいうと「地震はプレートが動くから起こる」のである。このような結論に至るまでに述べた大切なことを最後にまとめておこう。

- 地震はきまったところ（=同じところ）に繰り返し起こる。
- 地震は「密集地域」の隙間を塗りつぶすように起こる。
- 「密集地域」の中で、ある期間地震活動の低いところを「空白域」と言い、「空白域」の発生は地震の前兆現象と考えるべきである。
- 地震は断層運動によって引き起こされる。
- 断層は絶えず地震波を出しながら周辺に広がる破壊によって作られる。
- 断層は大きければ大きいほど、大きな地震動を地表に送り出す。
- 余震は「断層作り」の「仕上げ」として起こる。仕上げに要する時間は断層が大きければ大きい程長くなる。100年以上かかる場合もある。
- 余震の分布により、最終的に出来上がる断層

の輪郭を知ることが出来る。

- 断層運動は、地球内部の物質の不均質などところに異常に集中するストレスによって引き起こされる。
- 断層運動の元になるストレス集中は、プレートが絶えず動き続けるために生じる。

〈参考文献〉

「地震」 ブルース A ボルト著、
松田時彦・渡邊トキエ訳
古今書院、1995。