

島弧の形成と地震

鈴木尉元 = 通産省工業技術院地質調査所

現在の地殻変動と測地学

私達の足下にある大地は、不断に運動をつづけている。この大地の動きは、ふつう目でとらえることができない程に、きわめてゆっくり進行している。このような運動は、地図作製の基準とするために、全国の主要な街道にそって2 kmに1点の割合で設けられている一等水準点や、全国に網の目のように張りめぐらされている三角点を、精密に測量することにより明らかにすることができる。前者からは土地の上下変動が、後者からは、その水平変動がわかるのである。このように、現在の地殻変動を知る方法は、測地学的方法とよばれ、日本では、測量の開始された1880年頃からの大地の動きを、正確に知ることができる。

現在進行しているこのような運動は、きわめてゆっくりしたものであっても、ながい期間にはいろいろな問題をひきおこす。たとえば、灌漑施設や港湾施設など半永久的な建造物は、このような動きのために使用不能ということにもなりかねない。大規模な土木建設工事にさいしては、三角点や水準点をもとに、設計や工事が行なわれる。その際には、大地の動きも考慮しなければならぬ。さもないと、たとえば両側から掘りすすんだトンネルが喰いちがってしまう、というようなこともおこりかねないからである。この大地は、ときとしてその動きをまのあたりに見せてくれることがある。地震にともなう運動で、いままで海の底にあった土地が干しあがって陸地になったり、逆に陸地が海底に没したりした例は、わが国のような地震国では枚挙にいとまがない。また、断層を生じて地面がくい違ったり、地割れができたりすることも、災害をもたらすほどの大きな地震であれば、ごく普通にみられる現象である。

日本列島は、環太平洋地震帯の一かくをしめ、その周辺では、地球全体の地震エネルギーの10%以上が放出されているという。それだけに大地の動きは活発で、1年に1回ぐらゐは破壊的地震におそわれるのである。

島弧の形成と山地の上昇

今を去る200万年ほど前、第四紀とよばれる新しい時代が始まるとともに、それまで広く日本列島をおおっていた海はしりぞき、現在の島弧が形成されはじめる。さらに山地のはげしい隆起・上昇運動がはじまった。

水準点の改測結果によると、平野から山地に向

う水準点は、いずれも上昇し、山地の隆起運動が現在もなお進行中であることをしめしている。その量は、もっとも大きな所で年間数mmにも達する所があるといわれている。もっとも大きな隆起運動は、本州中央部に陣どっている日本アルプスで、その隆起量は、第四紀を通じておよそ1700mにも達したであろうと推算されている。本州中央部には、房総半島をはじめ、三浦・伊豆・紀伊などの諸半島が太平洋に突きだしている。これらの半島の現在の動きを調べてみると、いずれもその中央部が隆起し、周辺の海域に向って沈降するような運動をおこなっている。つまり、日本列島を形成する運動は、現在もなお不断に進行しているのである。

上昇する山地と断層の成長

今から約2,500万年前の新第三紀の初頭、日本列島をふくむ東アジアの東縁地域は、はげしい断層運動の舞台となった。この運動にともなう大量の火山岩がふき出し、断層運動にともなう形成された陥没盆地をうめていった。いわゆるグリンタフ造山運動である。東北日本について見ると、この新第三紀の火山岩は、図1にみるようにその中央部にそって広く、しかも厚く発達している。そして、それらの間やその周辺地域には、すでに古い時代に褶曲や断層運動をうけた、古生層や中生代の花こう岩からなる基盤岩が、沈降運動からとり残されたように分布している。

北上山地、朝日・飯豊山地、阿武隈山地、越後山地などがその代表的なもので、それらは現在、その名のしめすとおり山地を形成している。つまり、新第三紀の始め頃、これら山地の周辺地域でははげしい火山活動が行なわれ、沈降して火山噴出物をあつく堆積していったが、これらの山地は火山活動の舞台にはならず、沈降から取り残された隆起帯を形成していた。これらの山地を構成する基盤岩は、その周辺地域では、ときに断層によってもみくちやにされ、また地下深部から上昇してきた火山岩が貫入するところとなった。

この火山岩は、新第三紀の初頭のもので、その時期にすでに断層が発生し、火山岩の貫入に利用されたのである。

ところが、これら新第三紀の岩石も、現在、断層によって切られているのである。このことは、新第三紀に活動した断層が、その後の新しい時期にふたたび活動していることを示している。こ

れらの山地が現在も隆起・上昇しているとする、その周辺の断層も同時に成長しているに違いない。断層が成長しているとすれば、そこは同時に、地震活動の場ともなるであろう。

図2・図3は、朝日・飯豊山地と阿武隈山地周辺の地震活動の様相である。現在の日本の地震観測網では、震央位置が内陸で±5 km位の精度で決定されるといわれている。この精度を考慮すると、地震の震央が、基盤岩とその周辺の第三紀層との境界付近に集中することを、これらの図は示している。すなわち、基盤を区切る断層付近に、地震は多く発生するのである。このことは、基盤の分布を画すこれらの断層が、現在も活動している活断層であって、山地の隆起・上昇運動にともなう成長しているものであることを明瞭に物語っている。このことを模式的に描いたのが図4である。

図2・図3に示したものは、比較的規模の小さい地震であるが、過去の内陸山地の周辺におこった破壊的地震としては、1931年の西埼玉地震、1949年の今市地震などが知られている。前者は関東山地の東北縁、後者は足尾山地の東北縁に発生したものである。これらの地震も、山地の隆起・上昇にともなうその周辺の断層の活動にともなう発生したものである。

このように、東北地方中東部の地震は、断層によって区切られた地塊の上昇運動にともなう発生していることがわかるのである。

進行する褶曲運動 背斜の形成と地震

では次に、日本海にそった地域の地質構造と地震活動との関係についてみてみよう。

日本海にそった秋田・新潟の両県は、わが国有数の石油産出県である。石油は一般に、地層が上に凸に褶曲した背斜とよばれる構造の深部に胚胎されている。図1からもわかるように、日本海にそった地域は、多くの背斜構造の発達していることによって特徴づけられる。

この地域の地形と地質構造とは、きわめて顕著な対応がみられる。すなわち、背斜は多く丘陵をなし、その間にはさまれた向斜は、対称的に、谷ないし平野となっている。つまり、地表の高低は、地下の地質構造をひじょうによく反映しているのである。このことから、油田地帯を構成する背斜や向斜は、漠然ときわめて新しい時代に形成されたものであろうと考えられていた。

この油田地帯に一等水準点が設けられ、その改

図1 - 東北日本の地質構造区分図



図4 - 基盤岩の上昇と断層の成長を示す模式断面図

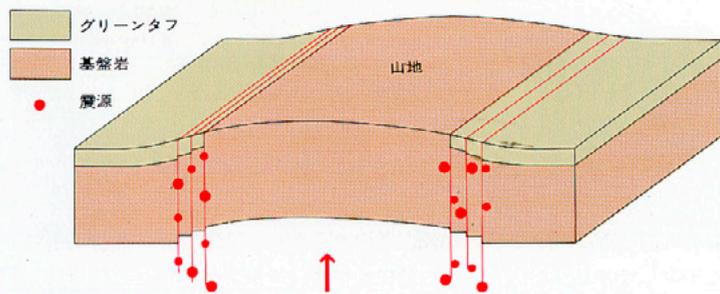


図2 - 阿武隈山地とその周辺地域の震源<80 km未満>分布図

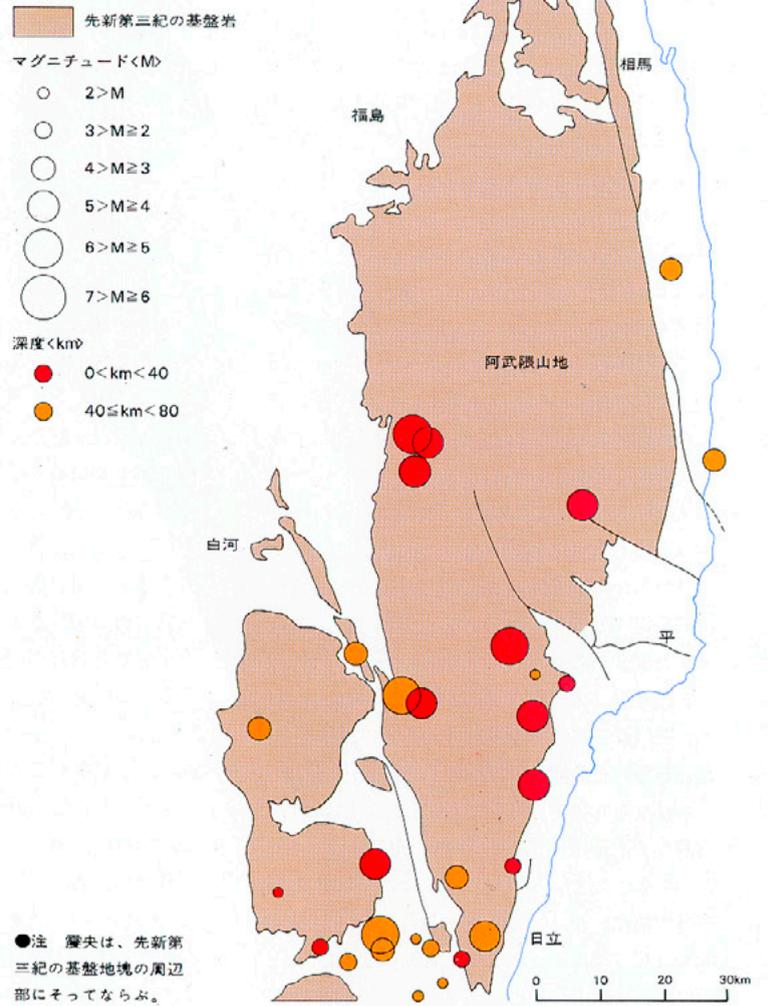


図3 - 朝日・飯豊山地とその周辺地域の震源分布図

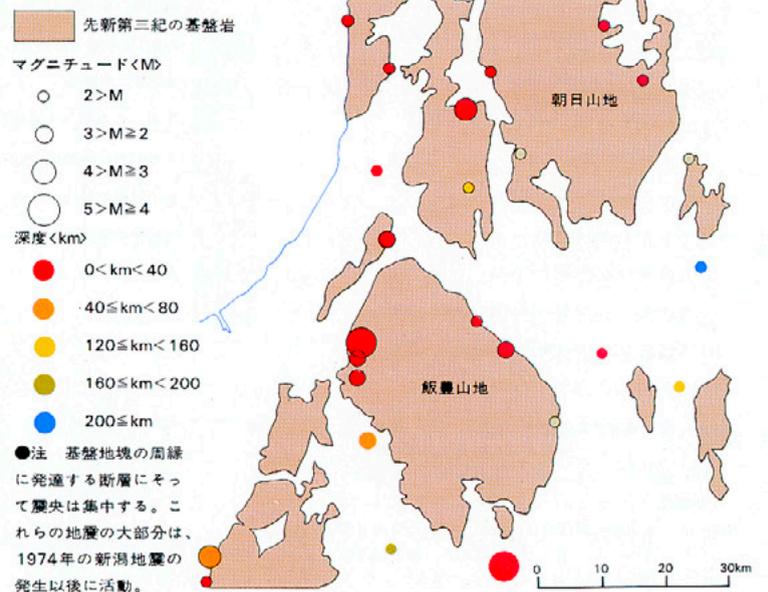
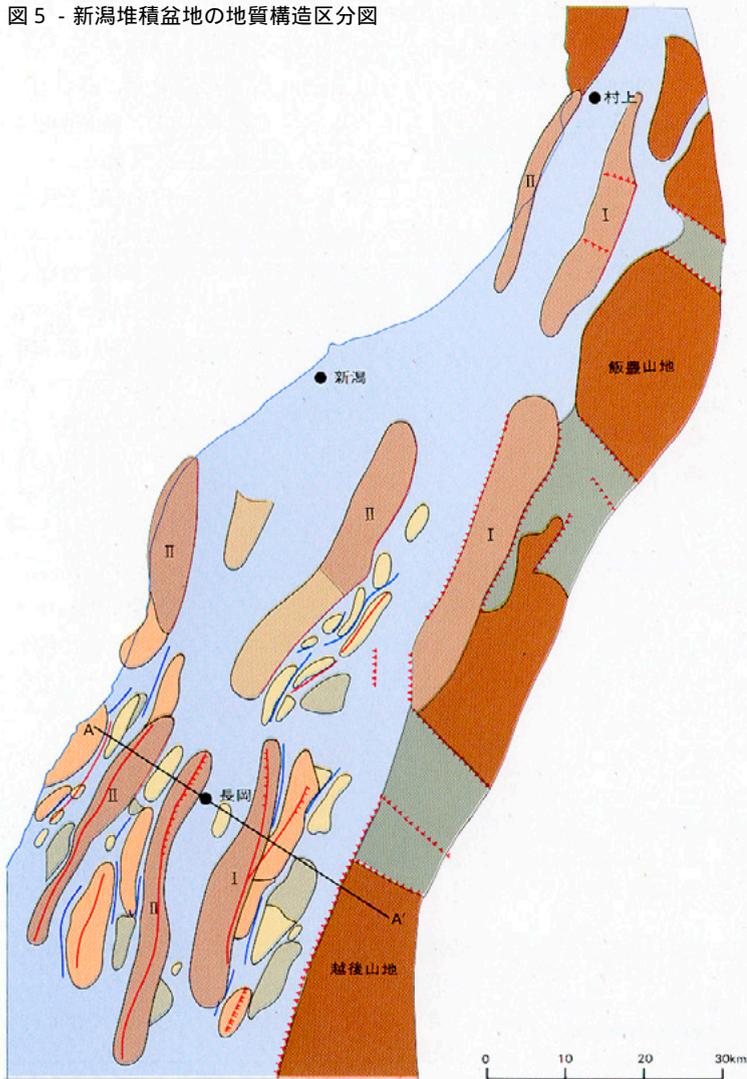


図5 - 新潟堆積盆地の地質構造区分図



●図5の凡例

- 基盤岩塊
- I 中核部に基盤の露出する第1級背斜<注>
<横曲げ褶曲>
- II 中核部に基盤の露出していない第1級背斜
<横曲げ褶曲>
- 沈降した第1級背斜<横曲げ褶曲>
- 第3級の横曲げ褶曲
- 第2,3級の縦曲げ褶曲
- 第2,3級の向斜
- 傾斜が10°以下の地域
- 主として大谷川期以後に活動した断裂
- 主として椎谷期以後に活動した断裂
- 主として後魚沼期に活動した断裂

<注> 横曲げ褶曲=地層面に垂直に下から基盤が上昇することによって形成された褶曲 (図7参照)
縦曲げ褶曲=地層面に平行に横から押されて形成された褶曲
第1級・第2級・第3級は、背斜・向斜の規模を示し、第1級は長さが30km以上のもの、第2級は5km以上、第3級はそれ以下のものである。

図6 - 西山・中央油帯とその周辺地域の走向線と関原地震との関係

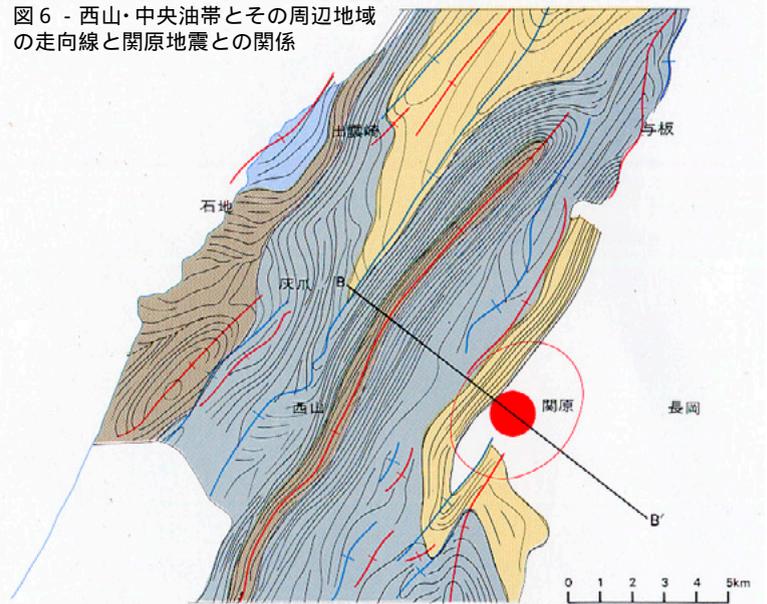


図7 - 関原付近を通る地質断面と関原地震の震源との関係<図6のB-B'断面>

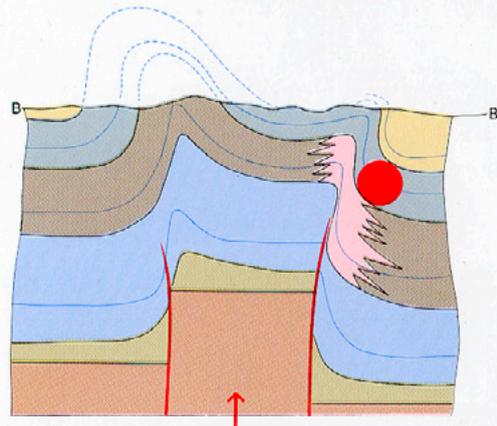
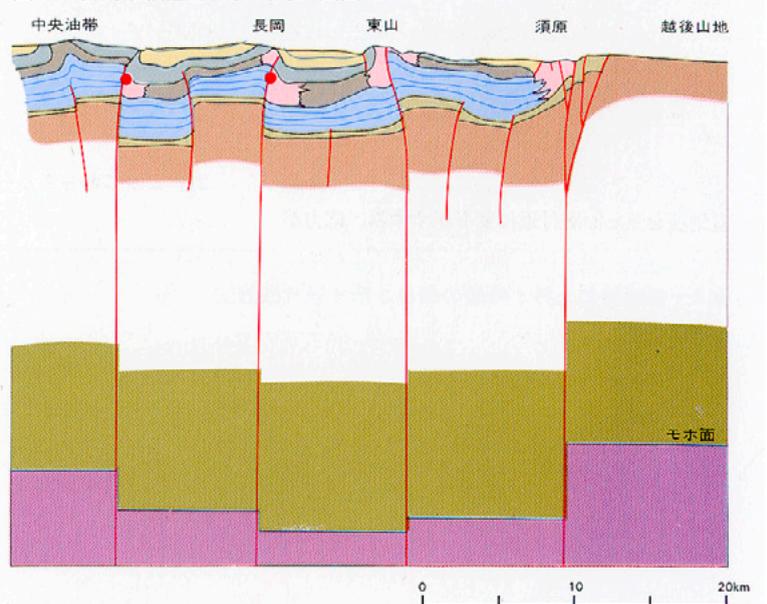


図8 - 新潟堆積盆地の模式的断面<図5のA-A'断面>



●図6, 7, 8の共通凡例

- 魚沼層 <第四紀>
- 西山・灰爪層 <鮮新世>
- 椎谷層 <中新世>
- 寺泊・七谷層 <中新世>
- 大谷川層 <中新世>
- 火山岩及び火山砕屑層
- 先新第三系
- 下部地殻
- 上部マントル
- 震源
- 背斜
- 向斜

測結果から現在の地殻変動の実体が明らかにされたのは、1920年代になってからであった。その結果は、現在もなお、背斜は上昇しているのに対して、向斜は沈降していることを示していた。つまり、油田地帯の褶曲のあるものは、現在もなお成長をつづけているということが、あきらかになったのである。

この油田地帯の褶曲は、名前から想像されるような地層がスムーズに曲ったものではない。新潟油田についてみると、その骨格を形づくっているもっとも大きな規模の褶曲は、箱型褶曲とよばれる角ばった肩をもった背斜である。ちょうど箱をさかさまに伏せたような形をしているので、この名がある。新津油田、東山油田などの大油田の多くは、このタイプの褶曲中に発達している(図5)。

これらの褶曲した地層は、新第三紀の主として砂岩や泥岩からなり、厚いところで6,000m以上にも達している。これらの地層は、きわめてやわらかく、石油は、砂岩などの空隙中に胚胎されている。そしてこれらの地層の下には、古生層や白亜紀の花こう岩が基盤として横たわっている。古生層は、新第三紀層が堆積する以前に褶曲や断層運動を受け、きわめて堅い岩石に変わってしまっている。花こう岩も、きわめて堅い岩石で新第三紀の地層のように褶曲しない。これら基盤岩の露出している所での観察によると、新第三紀ないし第四紀の運動にさいしては、基盤岩は断層によって割れ、地塊(ブロック)として運動をしたことが明らかにされている。油田地帯でも同様で、この基盤地塊の上昇を直接反映したのが、さきの箱型褶曲と考えられる(図7)。基盤を区切る断層を通じて、箱型褶曲の翼部には、地下深部からもたらされた火山岩が分布している。

このような褶曲が現在も成長をつづけると、基盤地塊を限る断層付近に変形がすすみ、応力が集中し、断層が成長して地震が発生する場にな

りやすい。1927年10月27日、新潟油田のほぼ中央部の長岡市西方関原^{せきばら}ふきんに地震が発生した。震源が浅かったために、被害は局所的であったが激しいものであった。同村では、全壊家屋2軒、半壊家屋3軒、そのほか壁や家具などの破損した家が31軒にもおよんだ。

この地震の被害の分布、石どうろう・墓石や門柱などの倒れた方向や回転した方向から求めた震央位置は、平野と丘陵との境界付近、つまり、箱型褶曲の急傾斜した翼部付近であった。しかも、地震波の方向を解析した結果は、この地震をひきおこした断層の傾きはほとんど垂直で、丘陵側すなわち箱型背斜の頂部が、平野部に対して、隆起上昇したものであることがあきらかになった。

1961年には、やはり局地的な破壊をもたらした長岡地震が、長岡市西部におこっている。この地震も、平野下の背斜構造の成長にともなって発生したものであることが、一等水準点の改測結果や地震波の解析からあきらかにされている。このように、東北日本の日本海にそった地域の地震も、基本的には、地塊の上昇運動にともなって発生しているのである。

伊豆半島沖地震から
昨年5月9日午前8時33分頃、伊豆半島の南部は、マグニチュード6.9の大きな地震に直撃された。内陸に発生する地震は、もっとも大きなものでもマグニチュード7クラスであるから、規模としてはかなり大きな地震に属するものであった。この地震にさいして、半島南端の石廊崎^{いろうさき}付近から北西方に5 km以上ものびる、石廊崎断層が出現した(図9)。この断層を境に、北東側の地盤は30 cmあまり南東方に移動し、かつ10 cmあまり沈下した。このため、たまたま断層上に位置していた家屋は土台から破壊され、とりこわさざるをえない程の被害をこうむった。

地震による災害は、半島南西部一帯におよんだ

が、とくに石廊崎断層付近では被害が大きく、山くずれ、落石によって多くの家屋がつぶされた。ほぼ中心にあたる中木地区では、山くずれによって、30名もの犠牲者をだし、直下型地震の恐ろしさをまのあたりに見せてくれた。

伊豆半島は、新第三紀の中新世には活発な火山活動の場であった。今日では、ほとんど火山活動の気配の見られない南部地域も例外ではなく、今回の地震活動の中心となった南西部では、溶岩流や大規模な岩脈が貫入した。なお、第四紀にも小規模ではあるが、火山活動がおこなわれていたことが近年あきらかにされた。このように、石廊崎断層が出現したり、余震活動が活発に行なわれた伊豆半島南西部は、古くから断層活動が活発で、それにそって火山活動もはげしかった地域にあっているようである。なお、石廊崎断層自身も、今回はじめて動いたものでなく、以前すでに動いた所が今回ふたたび動いたものであることが、断層面に残されていた古い断層粘土の存在から明らかになった。

伊豆半島には、半島を一巡する一等水準点が設けられている。この路線は、1973年に測量がおこなわれ、地震後まもなく南部だけ改測されたために、地震にともなう地殻変動の一端をとらえることができた。この結果、石廊崎断層から数 km 以上はなれたところでも、かなり大きな地殻変動がおこなわれ、石廊崎断層の5 kmほど北方の下茂付近では大きな不連続的変位のおこなわれたことがあきらかになった。なおこの付近は、地震時のものとは逆であったが、その前の1967~73年の測量結果でも、数10mm不連続的に変位していることは興味深い。

これらの事実を総合して考えると、今回の地震は、古い時代に活動した断層がふたたび運動することによって発生したこと、半島南部は、この地震にともなって地溝状に落ちこんだことがわかる。

図9 - 伊豆半島沖地震前後の地殻変動

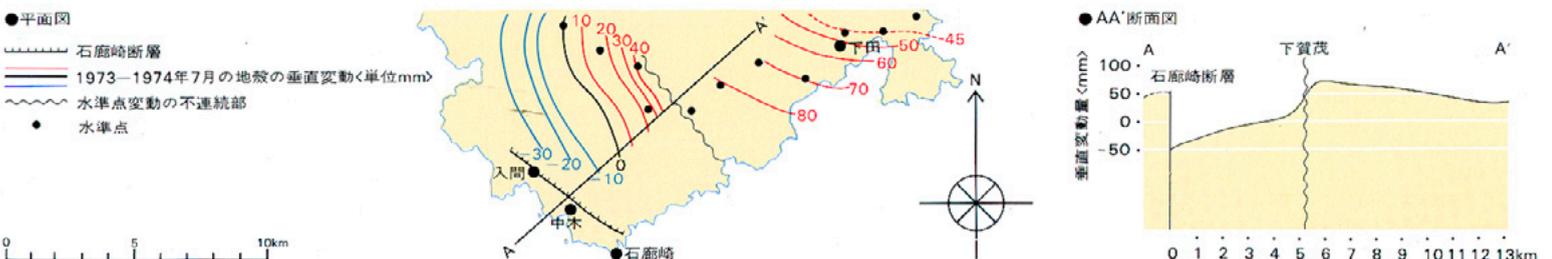
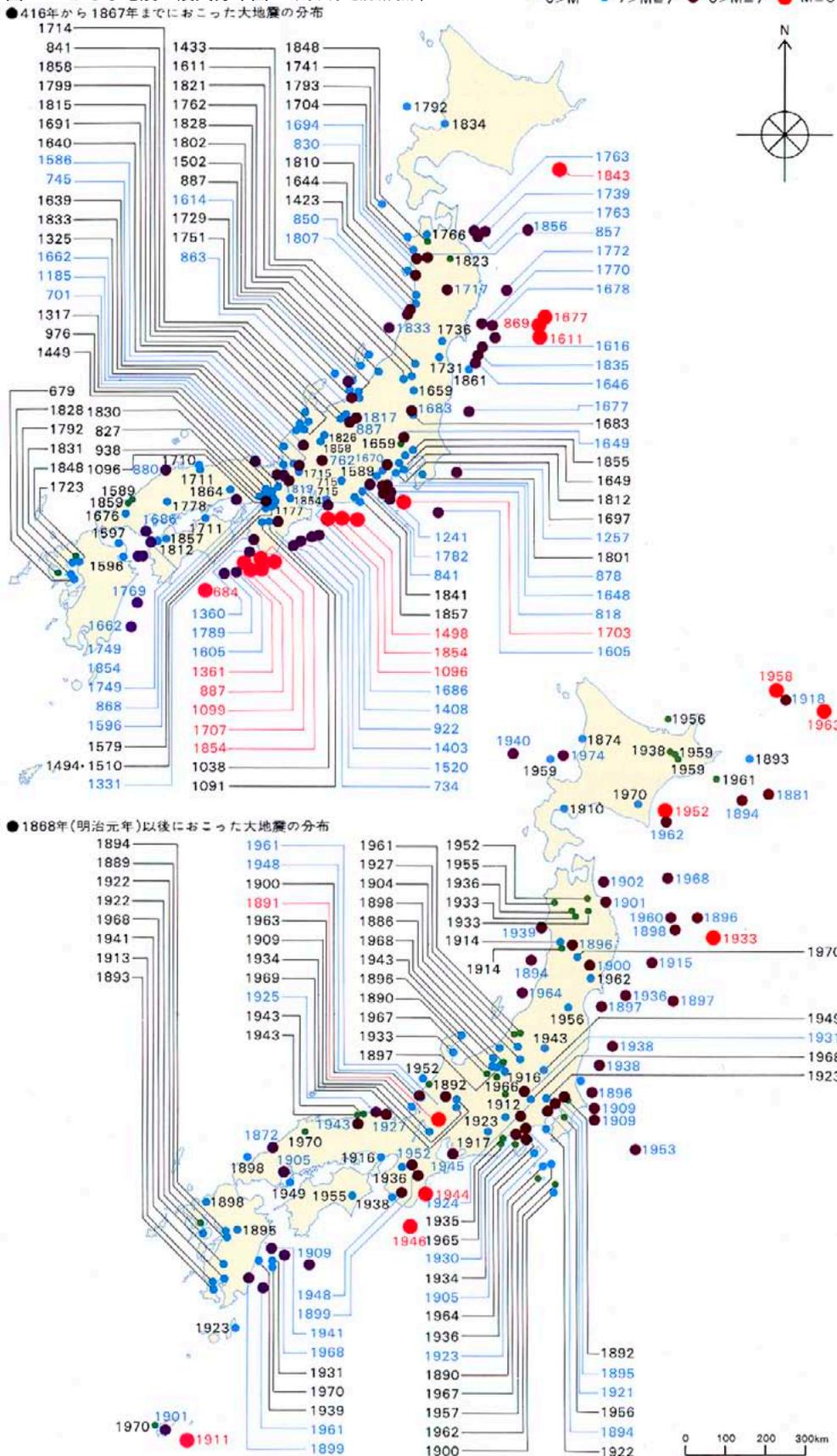


図 10 - おもな地震の震央分布図 <東京大学地震研究所, 1973>



大きい地震・小さい地震

日本ふきに発生する破壊的地震の分布に一定の規則性のあることは、古くから気がつかれていた(図10)。もっとも大きい規模のマグニチュード8クラスの地震は、日本列島の太平洋沖合地域にしばしばおこる。このクラスの地震は、ときに、中部山地周辺にもおこるようである。マグニチュード7クラスの地震は、この太平洋沖合地域と、日本海ぞいの地域にしばしば発生する。そのほか、東北地方北部や関東地方などの内陸にもおこる。さらに一桁下のマグニチュード6クラスの地震は、巨視的にみると、日本中どこにもおこるといってもよさそうである。このような地震の発生は、どのような地殻変動に支配されて行なわれているのであろうか。東北日本の太平洋沖合地域からは、地質学的にはごく新しい鮮新世以降にごく浅いところでつくられた礫が、現在では、深さ1,000m以上の海底から発見されている。また日本海では、陸上での浸食によって形成されたと考えられる谷地形が、現在では2,000mもの深海にまで追跡されている。

これらの事実から、日本列島周辺の海域は、ごく新しい時代に数1,000mにも達する急激な沈降運動をおこなったことが予想されている。第四紀における日本列島の隆起運動にともなうこのような急激な海域の沈降運動は、当然、両者の境界付近に大きな歪の集中域を生じさせるにちがいない。

このような運動が現在も進行しているならば、そこに地震が発生し、しかも、日本列島と太平洋ないし日本海といった、大規模な構造単元の運動にふさわしい大きな地震がおこるにちがいない。これが、外側地震帯あるいは内側地震帯にそって、もっとも規模の大きな地震のおこる原因である、と筆者は考えている。

地震をおこす力

この小論では、日本列島内部に発生する地震は、大・小ささまざまな規模の地塊の隆起上昇運動にともなって発生する、という主張で終始してきた。

ところが、よく知られているように、日本列島は太平洋東部に発生した厚さ100 kmほどのプレートが沈みこむところに位置していて、日本列島内部の地震は、このプレートの横圧力によって発生するのだという解釈がある。この近年隆盛をきわめているプレート・テクトニクス仮説

によれば、さきにもべた地塊の上昇運動も、この横圧力によると考えるわけである。

地殻変動の第一次的な原因が、水平方向の力によるのか垂直方向の力によるのかという問題は、きわめて古い時代から議論されてきたもので、近年も新たな資料をもとに論議がくり返されているのである。

ところが、地殻を波状に変形させるには、現在地殻中に想定される応力の10倍ないしは100倍にちかいものがなければならぬとされている。さらに理論的な計算によると、地殻に横圧力が加えられると、大きな波状の変形はおこらず破壊してしまうという。このような資料もあって、筆者は、垂直方向の力ないし運動が、地殻変動の第1次的なものだと考えるのである。

地震予知の具体的な計画の策定には、この仮説の選定が大きな役割をはたす。水平の圧力が第1次的な地殻変動の原因であるという立場では、日本列島のどこかに断層を生じ地震を発生させる。この断層は、何回かくり返して運動する。したがって、この活断層の分布をあきらかにしその周辺の運動を監視することが重要な課題になる。

一方、垂直な力が第一的な原因であるとする立場では、地塊の垂直な変形がある限界にたつと、その周辺のどこかで断層が成長し、地震が発生する。したがって、地殻の変形を面的にとらえて、それを監視しなければならないということになる。

したがって、地震の予知は、これら両仮説の有効性を検証する重要な問題ということができるであろう。

地下水位の変化と地盤の運動

昨年12月にひらかれた地震予知連絡会の席上で、川崎付近の一等水準点が異常に隆起している事実が、国土地理院から発表された。この現象が、直下型地震の前兆ではないかということで、川崎だけでなく、隣接する横浜や東京南西部に住む人々を大きな不安におとし入れたことは、まだ記憶に新しいところであろう。

ところがその後、この地盤の上昇現象と関係をもつと思われる、つぎのような事実が明らかになり、事態は新しい段階を迎えるにいたっている。地下水の過剰なくみ上げによって地盤が沈下する現象は、戦前から東京や大阪などの大都市で知られていた。ところが第二次大戦中、とくにその後半期には、これら大都市の工場や民

家の大部分が破壊され、揚水量が大巾に減少するとともに、地盤沈下現象も一時見られなくなった。ところが1950年代にはじまる経済の高度成長ともなうって、地下水の揚水も大巾に増加し、地盤沈下も戦前とは比較にならない規模で進行するにいたった。この目に見えない形で進行する地盤沈下現象は、東京の江東デルタ地帯のような分厚い堤防に囲まれた、広域の0m地帯を出現させた。

このような事態の深刻化とともに、ようやく地下水の揚水が大巾に規制され、所によって地下水位が多少回復する所も見られるようになってきている。しかも、それとともに従来観測されたことのない地盤が上昇するといった現象が、あちこちで観測されている。

じつは最近の調査結果によると、問題の川崎付近でも地盤沈下防止のために揚水が規制された井戸が多数分布し、地下水位が回復していることが明らかにされた。しかも地盤の上昇量は、地下水位の回復ときれいな相関をしめし、その量は、従来各地で観測されている水位の回復量にほぼ見合う程度のものであるという。

地震予知への道

いつ、どこに、どのくらいの規模の地震がおこるかをあらかじめ知り、被害を未然に防ぐこと、これが地震予知の目標である。

これまでにあげたいいくつかの例からもわかるように、地震がどこに、またどのような条件でおこるかについては、内陸については地質学的・測地学的方法によって、しだいに明らかになってきている。また、伊豆半島沖の地震についてみたように、地震発生前にすでにその兆候があらわれている例も見出されている。

ところが、人口が集中し、地震が発生したときにきわめて大きな被害が予想される関東平野などの平野地域が、未解決のままに残されている。それは、関東平野などはあつい第四紀層におおわれているために、地震の発生と関係するような深部の地質構造をあきらかにすることが容易ではないからである。

ところが近年、少しずつ関東平野の内部の構造も解明され、地震発生のもととなる活断層の分布が、具体的にあきらかにされようとしている。さらに、地殻の変動を短期間にくりかえし測量し、また微小な地震を観測して地震の前兆をとらえる試みがなされようとしている。

ところが、この地域は多くの雑音が発生し、ま

た川崎市の問題に見られるような人工的な地殻変動がくわわるために、本当の地震の前兆をとらえることが他の地域にくらべてむずかしい。これらの障害を克服して、地震予知への道をきりひろくには、まだまだ解決しなければならない多くの問題が残されている。

図 11・A - 川崎市付近の地盤の隆起

期間：1970-1975 <国土地理院地殻活動調査部，1975>

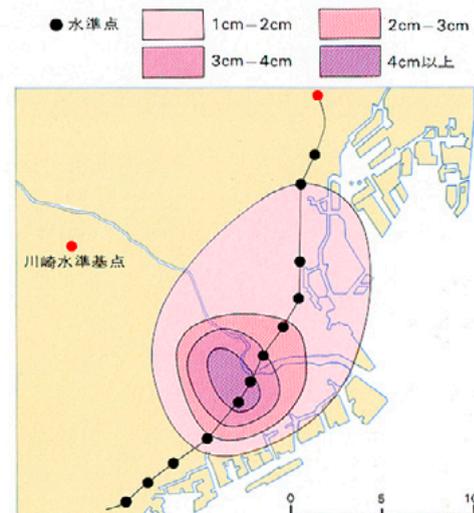


図 11・B - 川崎市付近の地下水位の変化

<脇田 宏，1975>

