

私の地震観と地球観*

Some considerations on earthquake and plate tectonics

藤井陽一郎**

Yoichiro FUJII

1. 地震の原因

地震の原因というような用語は素人めくが分かり易いためにここでは使わせていただくことにして、地震の原因を「直接原因」と「間接原因」とに分けてみる。直接原因の内容としては、従来地震学で、地震のメカニズムとか発震機構とかよばれていた分野がまず考えられる。震源から発した地震波がある観測点に到達したときの最初の地表の動きを初動というが、初動を数多くの観測点で観測しその大きさや方向を解析することによって、震源においてどのような力が作用したのかを推定することができる。このような検討の結果、地震波は急激な断層運動によって生成したものであることが分る。しかしこの方法では、断層運動を規定するさまざまなパラメーターが数量的に求められるわけではない。一方、60年代から70年代はじめにかけては、断層運動に関する数理的弾性力学がくわしくしあげられ、地震記象や測地的地殻変動のデータをもとに、各地震の断層運動のパラメーターを求めることが可能となってきた。地震学のこのような領域は、震源過程論などとよばれている。岩波地球科学講座8の『地震の物理』では、同じ断層地震説でも前者を「古典的地震学」といい、後者を「近代的地震学」といっている。けだし、最近10年間あまりの間に確立した後者の断層地震説を戦前すでにその基本的内容が展開されていた前者の断層地震説から区別するための方法として適切な表現であろう。

要するに今日では、長年にわたる地震の研究の結果として断層地震説は計測上でも理論上でも地震の直接原因として確立していて、他の原因はまず考えられないのである。時に、今日でも断層地震説と例えば地震の原因としてのマグマ説とを並記して書く人もいるが、これは全く不適切なわけである。ところで、地震現象の基本的プロセスは断層運動だとして、地震に関連した重要なすべての現象の解明がこれにつけるのかといえ、そうではない。結果として地震は断層運動であるとして、そのくわしい過程が分っているわけではないし、そのような断層運動が可能になるにはそこに応力の集中がなくてはならないと考えられるが、応力集中の具体的プロセスは解明されていない。応力集中の背景としてプレートテクトニクスの立場から応力場を解明する研究は重要な成果をあげているが、直接上記の課題に答えるには至っていない。現在、このような課題につらなる研究領域としてサイスマテクトニクスなどとよばれる研究領域が開拓されつつあるが、要するに、地震発生の地学的背景をもっとくわしく展開する仕事が大きく残されていると思われる。このような課題と関係した地震の原因を、ここでは間接原因とよんでみることにすると、これははなはだ未完成の領域であるといつてよいと思われる。

本稿では、直接原因としての断層地震説をふまえつつ、間接原因を考えると私の私なりの一視点とでもいったことを述べてみようと思う。

2. 地震観の変遷

多くの地震学者は、大正の末ちかくまで、地震の原因としては、19世紀のヨーロッパの地質学者

* 構造地質研究会夏の学校(1981年)特別講演

** 茨城大学理学部地球科学教室

がとなえた説で間に合せてきたのである。例えば1923年関東地震の直後その頃の代表的地震学者である今村明恒が『地震講話』（岩波書店、1924）という本をかいたとき、地震を火山性と非火山性とに区別し、後者をさらに断層地震・地心地震・構造地震などよばれる地震と陥落地震とに区別したのであるが、これは地質学者 R. Hoernes が1878年ごろにとなえた説をふまえてのことである。昭和に入ってから、地震観について我が国の地震学者の間に大きくふたつの流ができた。この頃震源に働く力についての有力な情報を与えるデーターとして初動の研究が極めてさかんとなったのであるが、初動分布の解釈からふたつの流がつくられたのである。そのひとつは本多弘吉に代表されるダブル・カップルの力を震源に想定する断層地震説である。本多は、1931年にすでに、観測されたP波水平成分の振巾がひとつの節線から測った震央にたいする方位角 φ と震央距離 Δ の関数 $\Delta^2 \sin 2\varphi$ に比例することを見出し、S波とP波の最大振巾の比はほぼ $\cot 2\varphi$ となることを示して、このような初動の分布となるメカニズムとして震源にダブル・カップルの力を考えればよい、としていた。一方1929年に石本巳四雄は、1927年の丹後地震のあとの震源地での傾斜計観測の結果と地塊運動の考とを結びつけ、余震発生との関係に着目して、地震発生の原因としての岩漿貫入説を提唱した。1931年には、棚橋嘉一の、同年6月2日の深発地震の初動分布は直交する2本の直線の節線ではなく双曲線の節線によって押しと引きの領域がわけられるという発見があり、石本はこれに刺戟されて押円錐型初動分布の考を提出した。つまり震源に頂点を有する円錐を考えその中では押し波が射出されるとし、ここに岩漿が貫入してくることを考え、岩漿貫入説の立場から初動分布を説明したのである。しかし石本のこの考は、まもなく坂田勝茂が1940年11月18日の紀伊地震は引き円錐型発震機構であることを見出し（1941年）、他にもそのような発震機構の地震が見つかり、デッドロックにのしあげてしまうのである。

断層地震説のほうは、P波初動のみならずS波の初動分布も調べられるにつれ、ダブル・カップルのモデルの正しさがしだいに受け容れられるようになり、戦後はくいちがいの弾性論による断層運動はダブル・カップルの力を考えることと等価であることが数学的にもきちんと証明され、断層地震説は疑をいれないものとなっていったのである（この節全体については、藤井（1967）、宇佐美（1981）など参照）。

3. 地殻隆起と地震の発生

地震発生の際土地は水平方向にも垂直方向にも変動する。大きい地震の場合には変動も大きく、小さい地震の場合には変動も小さい。この変動の様子は測地測量をくりかえすことによって明らかにできる。昭和の初期我が国ではこのような実例がすでにいくつか得られていて、この情報もまた地震発生に直接関係した重要なデーターであろうと考えられていた。したがって、地震波の初動の研究と結びついた発震機構論はまた地震にともなう変動をも説明できるものではなくてはならない。このようなことから、本多弘吉は断層生成にともなう地殻変動の理論的研究も行ない、1930年の北伊豆地震にともなう地殻水平変動の説明を試みている。石本巳四雄は、P波の初動が圧縮である地域は地殻の隆起域であることを関東大地震、但馬、丹後その他の地震において発見し、この事実を押円錐型発震機構で説明した。つまり隆起の地殻変動は高圧状態にある岩漿が抵抗の少ない方向に貫入するために起ると考えたのである。今日では、地震にともなう地殻変動の問題でも断層地震説に軍配が上っており、くいちがいの弾性論にもとづいて、任意の走向・断層の長さ・巾・傾斜角をもつ断層面上で任意のくいちがいが生じたときの地表の変形はくわしく計算できて、多くの地震時の地殻変動は断層運動による変形として説明がつくことが判明している。

ところで、地震にともなう地殻変動のうち、地震時の変動は断層地震説で説明することができることは分ったが、地震前の異常地殻変動或は地震後の余効変動などはどう考えればよいのであろう

か。また群発地震の際などに著しい地殻の隆起が観測されるが、これはどういう現象なのであろうか。地震発生にあい前後して地殻の著しい隆起が生ずることがもっとも明瞭に観測されたのは1930年伊東群発地震の場合であろう。1930年2月より伊東の周辺で群発地震が起りはじめ、これは4月には一時止んだようにみえたが5月には再び盛んとなった。これも夏から秋の間は再び止んだが、11月に入ると再び活発となり、ついに11月26日北伊豆地震（マグニチュード7.0）の発生をみるに至った。この伊東群発地震の発生に関連して当時の陸地測量部・東京大学地震研究所は1936年まで計5回の水準測量をくり返し地殻垂直変動の推移を追跡している。この結果、群発地震の活動中地殻が隆起しその最大隆起域は時の経過とともに多少移動したこと、総隆起量は約30cm余りになり、群発地震は終了しても1933年ぐらいまで隆起が続いたこと、などが分った。第1図にその

後の経過も含めて筆者がとりまと

めた地殻隆起の推移を示す。さて、

この伊東群発地震の地殻隆起と

1930年北伊豆地震との関係であるが、

同年11月に発生した丹那

断層よりの地震を北伊豆地震の前

震と考えることは当時からすでに

是認されていた考えであったが、伊

東群発地震と地殻隆起を北伊豆地震

の前兆的現象と位置づけることは

ためらわれてきたのが実情であ

った。ところが長い間のこのよう

なためらいにけりをつけざるを得

ないような事件が1970年代後半

に起った。それは1976年に検出

されたやはり伊東付近の地殻隆起

とそれと相前後して発生した伊豆

半島とその周辺の微小群発地震活動

・いくつかの被害地震とである。1930

年の時には隆起が検出されたのは

伊豆半島東海岸ぞいの水準路線の伊

東付近のみであったが、1976年には

伊豆半島内にはもっと多数の水準

路線が設けられていてその改測が

実施され、隆起域の全貌が判明する

という大きな成果があげられたのである。

この隆起についても、その最大隆起部

は時の経過とともに移動した。そして

この隆起域の東南部で1978年1月14

日に伊豆大島近海地震（マグニチュー

ド7.0）の発生をみるに至り、さら

に1980年6月29日には隆起域の東

側に伊豆半島東方沖地震（マグニ

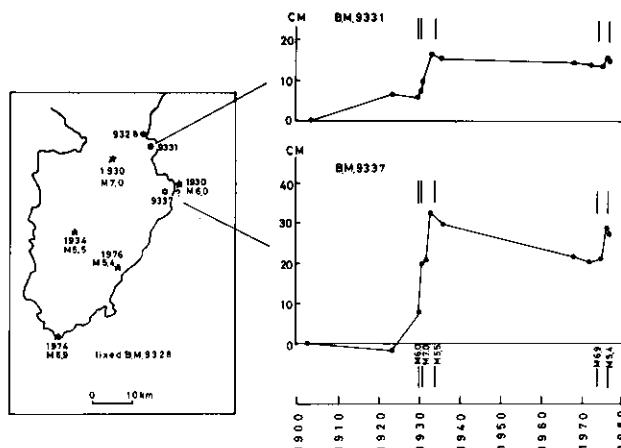
チュード6.7）が発生したのである。

このような1930年代の伊豆半島北

東部の地殻活動と1970年代の同

じく伊豆半島北東部の地殻活動とは、

群発地震活動の推移・地殻隆起の



第1図 1930年伊東群発地震の際の地殻隆起の経過。水準点9328を不動とし水準点9331, 9337の場合を示した。のちほどの議論に資するため1976年検出された異常隆起も合わせて示す。なお、1930～1976年間の主な地震の震央も記入。

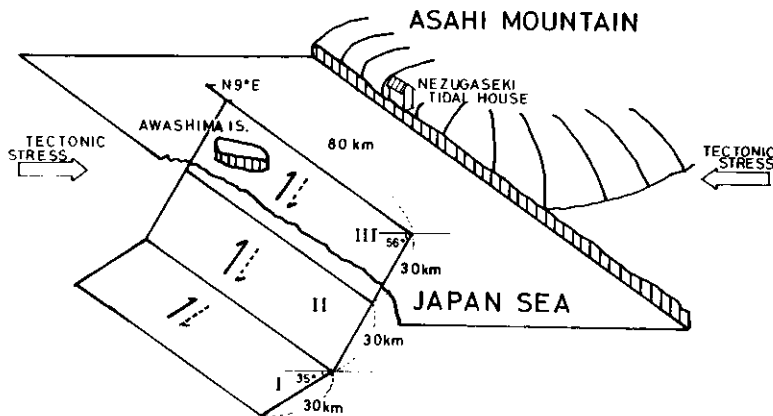
半島とその周辺の微小群発地震活動・いくつかの被害地震とである。1930年の時には隆起が検出されたのは伊豆半島東海岸ぞいの水準路線の伊東付近のみであったが、1976年には伊豆半島内にはもっと多数の水準路線が設けられていてその改測が実施され、隆起域の全貌が判明するという大きな成果があげられたのである。この隆起についても、その最大隆起部は時の経過とともに移動した。そしてこの隆起域の東南部で1978年1月14日に伊豆大島近海地震（マグニチュード7.0）の発生をみるに至り、さらに1980年6月29日には隆起域の東側に伊豆半島東方沖地震（マグニチュード6.7）が発生したのである。このような1930年代の伊豆半島北東部の地殻活動と1970年代の同じく伊豆半島北東部の地殻活動とは、群発地震活動の推移・地殻隆起の進展・大地震の発生という相互の関係の点で、非常によく類似している現象であるといえるのである。さらに1930年代の隆起域もほぼ今回のと類似していると考え、北伊豆地震は隆起域の西側に位置した地震であろうことが予想され、大地震は隆起域の中央部ではなくその周辺に発生していることが分るのである。

そこで問題となるのは、群発地震活動・地殻隆起・大地震の発生という相互に関連した現象をどう考えるかである。これについてはひとつの考が筆者にはあるが、それはプレートテクトニクスを前提としている話なので後に述べるとして、ここでは地殻隆起と地震発生という問題では1964年新潟地震の前兆性地殻隆起もまた重要な問題であることを指摘し、この地殻隆起のモデルを説明しておきたい。

4 1964年新潟地震の前兆性地殻隆起とそのクリープモデル

新潟地震とは、1964年6月16日、新潟県沖の粟島付近の海底を震源域として発生したマグニチュード7.5の地震である。この地震の発生に先行した前兆性地殻隆起は今日ではよく知られている。外国の地震予知の教科書にもよく引用されている。このときの前兆性地殻隆起は水準点によってそのパターンが異なっていて、この地方の日本海側をほぼ南北に走っている水準路線のうち、より北方に位置している水準点については、1955年ごろより1959年ごろまで6~7cmていどの異常隆起があったのに続いて、水準点は沈降しはじめ、そののち地震となり、地震時には著しく沈下したのである。一方南方に位置している水準点については、1955年ごろよりの異常隆起は地震直前まで続き、地震時には沈下したわけである。

このような異常隆起のメカニズムとして、かつて筆者は第2図のようなモデルを考えた。新潟地



第2図 1964年新潟地震の前兆性地殻変動を説明するモデル。本州と日本海間の地震時断層面(Ⅲ)の延長部に断層面Ⅱ、Ⅰを考え、Ⅰ、Ⅱでは低速すべり、Ⅲでは高速すべりが起った、と考える。

震の断層モデルとして ABE (1975) のモデルを採用し、その地震時断層面の延長部の地下深部に非常にゆっくりとした断層運動があったとする。地震発生そのものは数秒間で終了するような急速な断層運動であるが、特別な条件の下では数年にわたってゆっくりと進行する断層運動があってもおかしくはない、と考えてみるのである。このようなクリープ性の運動は地表でもサン・アンドレアス断層のある部分で認められており、脆性地殻より深い位置にある高温・高圧下の延性地殻・上部マントルでは十分このようなクリープがありうる、と考えられる。そして、上述の、震源域に近い日本海側の水準点全部が異常隆起した期間Ⅰと、北方で沈降南方で隆起という期間Ⅱと、地震発生時の期間Ⅲとに対応し、夫々の断層運動を次のパラメーターで与える。

期間Ⅰ 断層面傾斜角 35°, 逆断層 5 m

期間Ⅱ 断層面傾斜角 56°, 逆断層 3.3 m

期間Ⅲ 断層面傾斜角 56°, 逆断層 3.3 m

いずれの期間の断層も長さは80 km、巾は30 km、走向はN9°Eである。このときの地表の垂直変動は第3図に示すとおりであり、大凡のところは観測された地殻変動と調和的なのである(藤井(1976))。

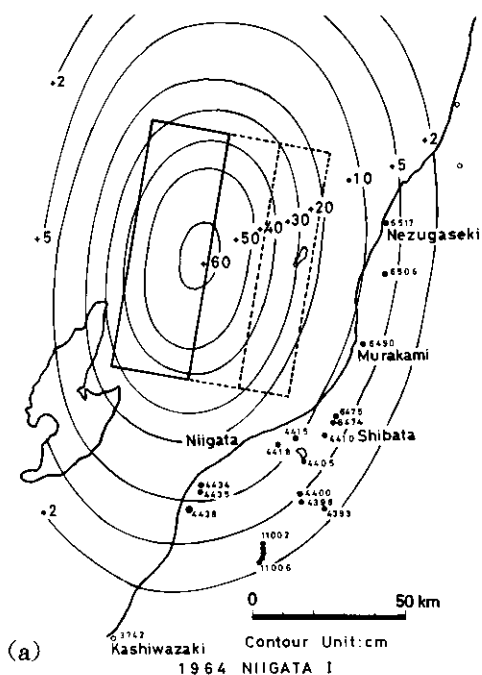
こうして観測と一致するモデルが得られたのであるが、果して地下深部のクリープ性の断層運動という考が唯一の妥当なモデルであるかどうかについては、なお問題が残る。観測事実を説明する他のモデルもあるかもしれない。また、果して本州と粟島の間に存在する断層の根が地下深部にま

でのびているかどうかについても、今のところ十分確かめられていない。したがってこのモデルの妥当性についてはさらにいろいろな側面からの研究が必要なのであるが、ここでは可能なモデルのひとつであることを述べておきたい。

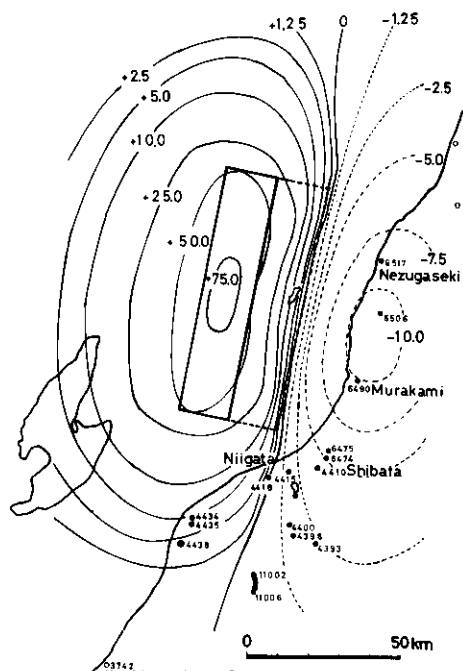
5. 伊豆半島周辺の地震テクトニクス

ここで話はもとにもどって、先に述べた伊豆半島の地殻活動についての考察をすすめたい。そして、観測された事実をどのように考えるかは伊豆半島周辺の地震テクトニクスをどのように組立てるにかかかっており、それはまたプレートテクトニクスをどのように位置づけるにかにかかってくる。

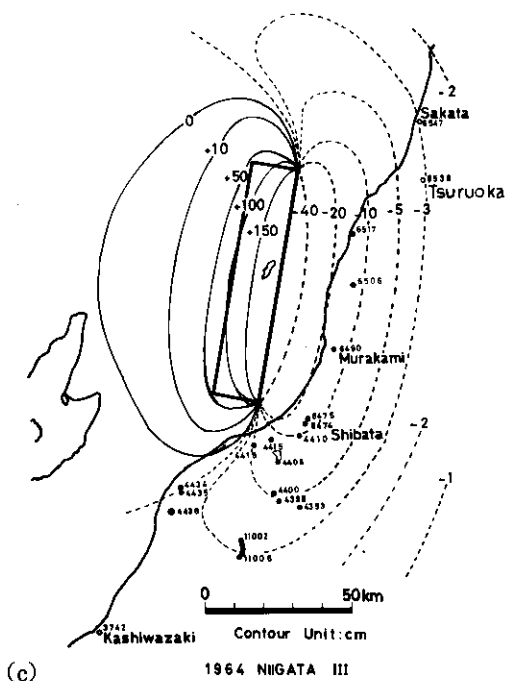
1968年に、MORGANやLe PICHONやIsACKS・OLIVER・SYKESらによってうちだされたプレートテクトニクスの原型は、いうまでもなく第2次大戦後の海底に関する地形・地磁気・地震活動・地殻熱流量などの諸観測事実を統一的に理解するためにくみだされたものであり、その実質的内容からいえば剛体と仮定された地球表面をおおいつくしているプレート相互の幾何学的運



(a)



(b)



(c)

第3図 第2図のモデルにもとづいて計算された夫々の時期の垂直変動。最深部でのクリープ性の逆断層運動では全般的隆起を示し(a)、中間では一部沈降・一部隆起を示し(b)、地震時では日本海海岸ぞい沈降であることを示す(c)。

動論であった。そして現在の海嶺やそれに直交する破碎帯また海溝や島弧のさまざまな地学現象の統一的理解への道を開いたことは大きな成功であった。従来、地質学・岩石学・地球化学・地震学・地磁気学などに分れてバラバラに発展してきた内容がひとつの枠組みにくくまれる可能性がでてきた。同時に、プレートテクトニクスの原型がプレート運動の幾何学であったことに示されるように、世界のテクトニクスの地学がこれですっかり終わったわけでもないこともたしかで、その後多くの研究者によって地学的肉づけの研究がなされ今も続けられているわけである。

伊豆半島周辺の地震テクトニクスに関しても、本州島弧とフィリピン海プレートの衝突によって物事を考えていこうという方向は多くの研究者によって採用されている考え方ではあっても、その細目は目下探求中であって出来上ってはいない。したがって議論のひとつであるが、1977年に私なりに考えたすじ道を説明したい。

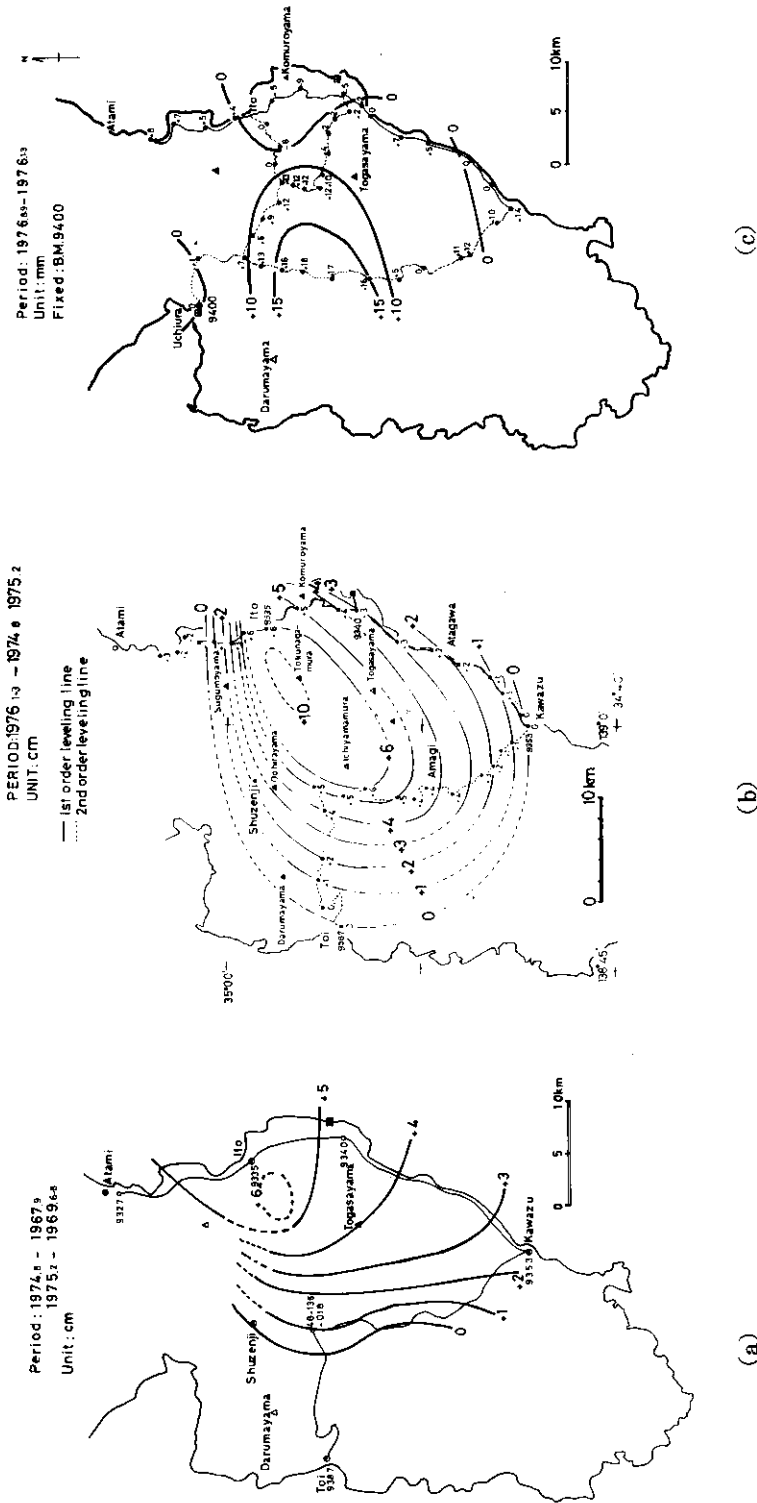
石橋克彦(1977)が指摘したように、私は伊豆半島東側の海域をはしっている伊豆東方線がフィリピン海プレートの収束の一部をうけもっていると考え。その根拠は伊豆半島北東部沖の西相模湾断層に関連しては十分にはっきりしている。海底地形上も断層の存在は明らかであるし、1923年関東地震の時の真鶴から伊東寄にかけての著しい地殻隆起と伊豆半島北東部の三角点の相模湾方向への著しい水平変位とから、ここにプレートのもぐりこみに関連した地震時の逆断層運動を考えることは合理的である。その地震時の地殻活動に続いておこった1930年代の伊東付近の活動は関東地震の余効的活動であり、1930年の北伊豆地震は関東地震の余震といえよう。伊豆半島と大島の間は、新しい時代の海底火山におおわれて伊豆東方線の存在ははっきりしないが、伊豆半島南部沖合では再びそのつながりの断層が確認されている。杉村新(1972)では、フィリピン海プレートの北縁は、駿河トラフから伊豆半島の北をまわり相模トラフへとぬける構造線であるとされたが、この説に疑問があるのは、現在伊豆半島北部では大規模な圧縮歪の存在は全くみられないし、歴史上の大震災も知られていないことである。したがって、石橋克彦(1977)のいうようにこの伊豆半島北部の境界は死滅しつつあり代って伊豆東方線が収束の一部をうけもちつつあると考える(のちの第6図参照)。

そして、1930年代の伊豆半島の地殻活動も1970年代のそれも、ともに、その浅部では固くロックされた伊豆東方線のスラストの深部において、それぞれの時期にゆっくりした逆断層運動が生じフィリピン海プレートの収束が一部まかなわれた、と考えることによって合理的な説明がつく。第4図は、夫々の時期の伊豆半島の観測された異常隆起である。各図を比較すれば分るように、最大隆起は多少移動している。この事実を解釈するモデルを第5図に示す。クリープ性の断層運動を3つ考えている。そのパラメーターは、

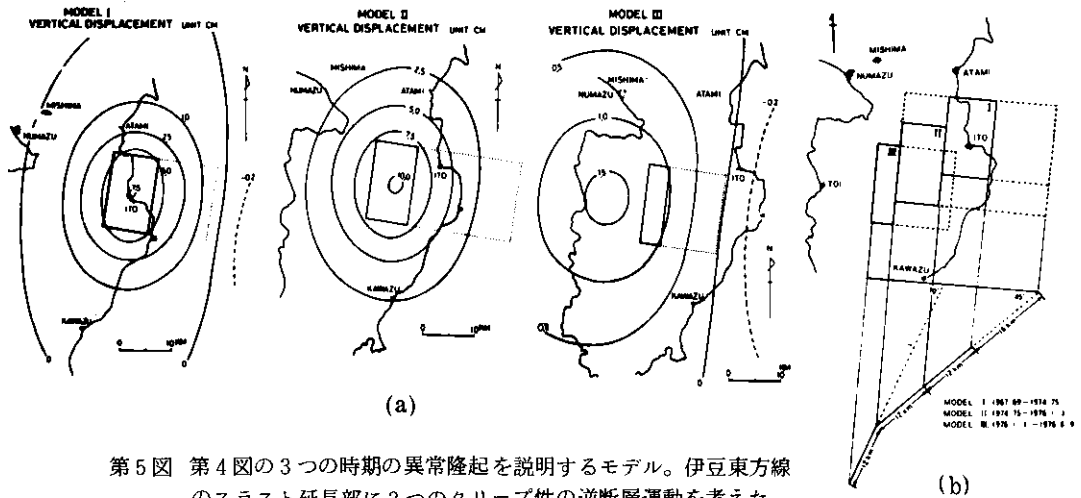
	断層面上端の深さ	逆断層すべり量
断層Ⅰ	11.3 km	0.5 m
断層Ⅱ	19.8	1.5
断層Ⅲ	28.3	0.5

であり、傾斜角はⅠとⅡがいずれも45°、Ⅲは70°、すべての断層面の長さは15 km、巾は12 kmである。第5図には夫々の断層運動による表面の垂直変形を「くいちがいの弾性論」で計算した結果が示されているが、これで大凡観測事実は説明できる(藤井(1977))。

なお、表面における地殻歪を計算してみると、隆起域の周辺に圧縮歪が生ずることが分る。とくに地中の断層面を地表へ向けて延長し地表と交るところでの歪の集中が著しい。伊豆半島はもともと北北西方向の圧縮の場にあり、地下深部でのクリープ性断層運動によって地表に付加的な歪がくわわりこれが蓄積歪を増加させれば地震活動をひきおこす可能性がある。こうして、隆起部の中心では地震が起らずその周辺でおこる理由が理解されるのである。



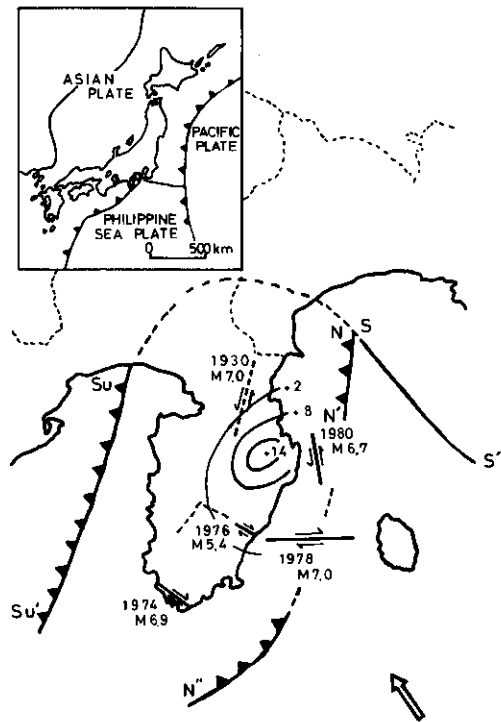
第4図 それぞれ3つの時期の伊豆半島の異常隆起。最初は伊東よりに隆起の最高部があったが (a), 西南方向へ移動し (b), さらに西南方向へ移動しつつづけている (c)。



第5図 第4図の3つの時期の異常隆起を説明するモデル。伊豆東方線のスラスト延長部に3つのクリープ性の逆断層運動を考えた(b)ときの垂直変動が示されている(a)。

第6図 近年の伊豆半島の異常隆起と被害地震発生の関係。挿入図は日本列島付近のプレート境界。地殻隆起域の周辺に地震が発生しているが、収束するプレートの深部でクリープ性の逆断層運動が生じて異常隆起をひきおこし、この隆起域の周辺に地殻歪の付加が生じて地震をひきおこすことを本文で論じた。異常隆起は1967/1969年より1976年までのもの。単位 cm。1970年代の主な地震断層とともに参考に1930年の丹那断層の運動も記入した。

- SS' : 相模湾断層
 - NN' : 西相模湾断層
 - NN'N'' : 伊豆東方線
 - Su Su' : 駿河湾断層
- 太矢印はフィリピン海プレートの北北西進の方向。



今まで述べてきた考をその後 1978 年、1980 年に発生した地震の断層の位置も含めて、まとめて第 6 図に示した。

6. まとめ——収束する海洋プレートのふるまいと応力集中

以上、地殻隆起と地震活動とがどのように関連しているかについて、観測事実をふまえながら、私なりのすじ道を展開してみた。日本列島に向って突進してきた海洋プレートは日本列島の下にもぐりこむことによって収束されなくてはならない。ふつうこの収束は巨大地震の発生によって一挙に実現されるわけであるが、時にはまた地域によっては非地震性の断層運動によってまかなわれてもよいわけである。そして、あるていどの地下深部で逆断層運動が起れば、その効果として地殻浅部の地殻歪の蓄積をもたらす部分が生じ、そこではあるていどの地震活動が生じ、時にはマグニチュード 7 前後の地震の発生もひきおこす。今ここでとりまとめたこのような過程は、プレートの収束に関連して地殻浅部に生ずる応力集中のひとつの場合を示したことになる。

私の地震観と地球観などという大きな表題をかかげながら、話は伊豆半島とその周辺の地震テクニクスに関する試論のメモ的な紹介にとどまってしまったが、ともかくもひとつの考え方を述べさせていただいたことで、表題の宿題にたいする私なりの答としたい。

文 献

- ABE, K., 1975, Re-examination of the fault model for the Niigata earthquake of 1964. *Jour. Phy. Earth*, 23, 349—366.
- 藤井陽一郎, 1967, 日本の地震学. 紀伊国屋新書.
- 藤井陽一郎, 1976, 地震とプレスリップ. 地震予知シンポジウム (1976), 127—137.
- 藤井陽一郎, 1977, 伊豆半島地殻隆起のクリープモデル. 地震予知連絡会会報, 17, 68—70.
- 石橋克彦, 1976, 「伊豆東方線—西相模湾断層」と伊豆異常隆起の解釈——フィリピン海プレート最北境界の二重構造. 地震学会講演予稿集, 2, 29.
- 杉村 新, 1972, 日本付近におけるプレート境界. 科学, 42, 192—202.
- 宇佐美龍夫, 1981, わが国の地震学のあゆみ. 地震 II, 34 (特別号 日本の地震学百年の歩み), 1—36.