

地震のメカニズムを追って

三 雲 健

1. ま え が き

“地震のメカニズム”という言葉には2つの意味があり、1つは地震を発生させる原動力あるいは原因は何かという問題、他の1つは地震が如何にして起るかという発生機構の問題である。前者は古来多くの議論が行われて来たが、1968年頃以後のプレート・テクトニスの登場によって、大地震を起す直接、間接の原動力がグローバルなプレート運動によることが明らかになって来ている。後者の問題はもちろん原動力と密接な関係を持つが、こゝでは地震発生機構がどのような経過を辿って明らかにされて来たかを、この問題を1つの研究テーマとして追って来た筆者の立場から振り返って見たい。

2. P波初動分布

震源のメカニズムを知る最初の手がかりとなったのは観測された地震波の初動方向であった。この方向が震央の方向へ向くか逆方向であるかは1905年頃大森によってすでに気付かれていた。1917年志田順(京大理学部地球物理学教室初代教授)は、各地のP波初動方向の押し・引きが震央を通過してほぼ直交する2本の直線によって4象限に分れることを初めて示し(Fig. 1)、このような分布は震源で割れ目が生成されたために生じたと考え、これを“crack earthquake”(裂罅地震)と呼んだ。この他志田は震央を囲むある半径の円内の観測点の初動がすべて引き波で、円外では押し波である場合も見出し、これを“陥没地震”と呼んだ。これらの発見は地震波の観測から震源のメカニズムを推定する重要な端緒であった。その後中村、本多¹⁾らもいくつかの浅発地震のP波初動分布が4象限型であることを確かめるとともに、1つの前線方向が震央付近に生じた断層あるいは既存の地質構造線の方向と一致することから、この前線で境される両側の地殻が反対方向にずれ動いたことが地震の原因であると解釈している。一方、このような4象限分布以外に、1931年頃棚橋、石本²⁾らは日本中部の深発地震の場合のP波初動分布が双曲線や楕円で境されることを見出し、これらが傾斜した円錐曲面の断面に相当することから、円錐型発震機構と称し、これを説明するために“マグマ貫入説”などを提唱した。このような型のメカニズムの可能性はその後和歌山地方の局地浅発地震の場合にも指摘されたことがある³⁾。たゞこれらの初期の観測結果は日本列島内あるいは極めて限られた地域での地表面での観測にもとづくもので、地殻や上部マントル内の速度構造による地震波線の曲りの影響が考慮されていないため、修正が必要である。

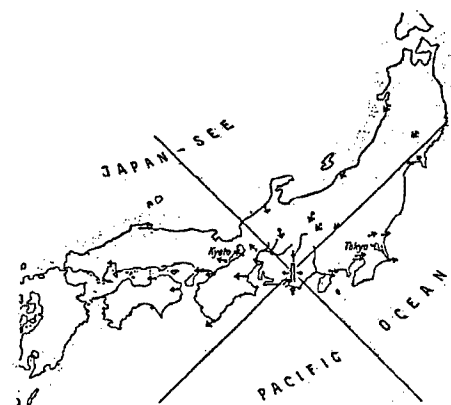


Fig. 1. Distribution of P-wave first motion directions that have been recorded during a crustal earthquake (M=6.3) in central Honshu, Japan, on May 18, 1917. (after T. Shida).

3. 点震源力源モデル

3.1 点震源に作用する力とP波, S波の振幅分布

P波初動分布は震源から地震波がどのように放射されたかを示す直接の手がかりを与えるから、この観測結果を説明するための理論的研究も1930年代から数多く行われた。無限の一様等方弾性体の1点に集中力が作用した時の媒質内の変位はすでにLove (1927)によって与えられていた。しかしこの場合の震源から遠方でのP波の極性分布は押し・引きの2象限型となり、普通の自然地震の場合の観測結果を説明出来ない。中野⁴⁾はこのLoveの理論をもとに、点震源に働く種々の力の組合わせを考え、これらによるP波とS波の変位分布を計算した。これらの解は本多⁵⁾によってまとめられている。このうち、大きさが等しく方向が反対の1組の偶力をsingle coupleと呼び、アメリカのByerly⁶⁾やカナダのHodgsonらはこれを断層の両側に働く力と考え、1926年頃から多くの観測結果をもとに断層の走向と比較している。一方、互に直交する方向に働く2組の偶力の組合わせをdouble coupleと呼ぶが、これは力学的にはこれらの偶力と45°の方向に働くモーメントを持たない圧縮力と引張り力の組合わせに相当する。本多⁵⁾は4象限型P波初動分布の観測結果を説明するためにこれを提唱し、長年にわたって論争が行われた。

3.2 S波の観測

この2つの型(前者をI型、後者をII型と呼ぶ)は、P波に関しては同等な振幅分布を与えるので、P波の観測だけでは区別が出来ず、S波の観測に俟たなければならなかった。本多は1930年の北伊豆地震の観測結果をもとに、P波水平振幅の方位分布のみならず、S波とP波の最大振幅の比がdouble coupleから期待される通りに分布することを見出している¹⁾。その後本多自身や市川、笠原らが行った日本列島周辺の浅発、深発地震のS波振幅や振動方向の研究⁷⁾、Stauder⁸⁾らが行ったアラスカ、アリューシャン、カムチャッカ周辺の地震の研究、Keylis-Borokら¹⁰⁾のP/SV、P/SV、SV/SHなどの振幅比の研究などは何れもII型(double couple型)のメカニズムが適当であることを示した。このようなP波とS波の振幅比による震源メカニズムの研究は国内の小地震についても行われた^{3), 11)}。

3.3 表面波の観測

一方、表面波の観測から震源での動きを知ろうとする研究は、1960年初めにBenioffが歪地震計によって、Lamb (1904)の理論から期待される通りの波形を観測したのが最初であろう。次いで1960年Akiは、地震記録中の表面波の波形を伝播媒質と記録系の影響を時間領域で補正の上、初期位相を求める方法を提出した¹²⁾。これによって1952年Kern Countyおよび1954年Nevada両地震の際にアメリカとカナダの東岸で観測されたLove波の初期位相がdouble coupleモデルから期待される通りのSH型分布を示すことが見出された。また環太平洋地震帯に起った50個の地震のRayleigh波の位相から、右横ずれ運動が卓越することも見出している¹³⁾。またBruneも1958年アラスカ地震の際に、Rayleigh波の初期位相と振幅が4象限型分布を示すことを見出した¹⁴⁾。同様なパターンはその後も1963年カムチャッカ地震などでも明らかにされた。このようなS波と表面波の研究は震源に働く力がdouble couple型であることを確証するに到った。

これ以後は、この型のメカニズムと同等な震源に働く主圧力・主張力とテクトニクスとの関係、あるいはP波前面と断層の関係に研究の焦点が移った。

4. 地震断層説

1891年本州中央部に起った濃尾地震は、日本列島内陸部に発生した過去最大(M≒8)であるが、こ

の時に地表面に出現した断層は延長 80 km に及び、その中央部では小藤の写真で有名な根尾谷断層が現われた。しかしこの断層の動きが地震の原因であるのか結果であるのかの解決には 70 年の年月を要した。次いで 1906 年サンフランシスコ大地震が起り、カリフォルニア中部に延長 400 km にわたってサン・アンドレアス断層を出現させた。この時の断層両側の土地は右横ずれ最大 6 m に及ぶ変位を示した。1911 年 Reid は¹⁵⁾、この測量結果をもとに“弾性反撥説” elastic rebound theory を提唱し、この地震の発生のメカニズムに 1 つの根拠を与えた。この説は、構造地震の原因である岩石の破壊が岩石の持つ強度を超える歪によって生じ、この歪は隣接する地殻の両側での長年月に亘る相対変位によって蓄積されること；地震発生の際に起る運動は、この両側の地殻が歪を解消する弾性的反撥であること；破壊は最初小部分から始まり急速に拡大して大きい破壊面を形成し、地震動はこの過程で発生すること；破壊の拡大速度は周辺の岩石内の縦波速度を超えないこと等、現在の断層破壊と地震発生の概念をこの時点で明確に述べていることは極めて注目される。先の Byerly らの single couple モデルはこの説に強く影響されたものと思われる。1960 年代後半にプレート・テクニクスが登場すると、このサン・アンドレアス断層は北米プレートと太平洋プレートの境界であるトランスフォーム断層であり、この動きは両プレートの相対運動と考えられるようになった。

1950 年代後半から 60 年代にかけて、世界各地の地震断層について、その長さ L と地震のマグニチュード M の関係について多くの研究が行われ、いくつかの経験式が示された^{16), 17)}。一方、測地測量によって地震前後の土地の変位が明らかになり、半無限弾性体中の 2 次元垂直横ずれ断層モデル^{18), 19), 20)}による静的変位と比較して、断層が達する深さや最大変位量などが、いくつかの地震断層（例えば郷村、丹那、Imperial valley, Fairvien Peak）などについて推定された。しかしこの時点ではこれらの断層は地震の結果と考えられていたように思われる。

5. 弾性体くいちがい理論

1950 年代後半、Steketee²¹⁾ は結晶転位論を弾性体に取り入れ、Volterra の定理をもとに、弾性体内部の“くいちがい”すなわちある面に沿う変位の不連続による媒質内部の静的変位と歪の分布を求め、あわせて微小面上の剪断型くいちがいによる変位場が、double couple 型の力源によるものと同等であることを証明した²²⁾。次いで丸山²³⁾はこの問題を無限弾性体内部に生成される断層の動的変位問題に拡張し、剪断型くいちがいと double couple の等価性が動的問題にも成立つことを明らかにするとともに、断層近傍および遠方での変位場の式を定式化した。同じ問題は Burridge & Knopoff²⁴⁾によっても扱われ、上の等価性が非等方不均質媒質内の動的問題にも適用されることを証明した。これらの研究は断層運動が double couple 型力源と同等な地震波を発生することを理論的に明確にした重要な研究であり、断層の破壊と生成が地震の原因であることがこゝに到って確立された。

1964 年丸山²⁵⁾は自由表面を持つ半無限弾性体中の断層に沿う静的くいちがいによる媒質内と地表面での変位の式を導き、地震の際に地表面で観測される土地の上下・水平変動量との比較の基礎を与えた。その後鉛直断層の場合の変位、歪、傾斜については Press²⁶⁾、一般的な傾斜断層の場合には Mansinha & Smylie²⁷⁾、佐藤・松浦²⁸⁾、岡田²⁹⁾などによる定式化がある。

動的問題としては、1966 年 Aki³⁰⁾は弾性体くいちがい理論にもとづいて地震モーメント $M_0 = \mu DA$ (μ は地殻剛性率、 D は平均変位量、 A は断層面積) を定義し、1964 年新潟地震の際の長周期表面波の解析から初めて M_0 の値を求めた。さらに余震分布と津波波源域から推定した断層面積をもとに、断層の平均変位量 (約 4 m) を求め、さらに静的クラック理論を適用して初めて応力降下量や解放歪エネルギーを推定した。次いで 1968 年 Aki³¹⁾は、1966 年カリフォルニア州 Parkfield 地震の際断層に近接して設置されていた強震計の加速度記録を積分し、同時に丸山の動的くいちがい理論によって地動変位波形を計算して

観測と比較し、破壊速度 2.2 km/s、破壊継続時間 2～3 sec、断層変位 50 cm という見積りを得た。これらの研究は断層くいちがい理論を初めて実際の地震に適用して、断層に関するいくつかのパラメータを定量化した最初の研究である。

6. 断層モデル

地震が弾性体内に起る剪断破壊すなわち断層運動によって起るものであることが確められると、1970年代以降くいちがい理論をもとに、多数の地震の断層の定量化が行われた。

6.1 静的断層モデル

断層を規定する静的パラメータとしては、断層面の長さ (L) と幅 (W)、断層面の走向 (φ) と傾斜角 (δ)、すべり方向 (λ)、および平均すべり変位量 (D) がある。これらの量は、それぞれ余震分布や津波の波源域、 P 波初動分布にもとづく断層面解、水準・三角測量にもとづく地震前後の土地の上下・水平変動などから推定されている。またこれらをもとに地震モーメント (M_0) や、静的クラック理論をもとに応力降下量 ($\Delta\sigma$) も求められる。例えば1923年関東地震 ($M=7.9$) の際の測量による上下・水平変動と、断層にもとづいて計算されたパターンとの両者の比較から、 $L=85$ km, $W=55$ km, $\varphi=N45^\circ W$, $\delta=30^\circ$, $D_s=6$ m (右横ずれ成分), $D_d=3$ m (逆断層成分) と推定されている³²⁾。また20世紀最大といわれる1964年アラスカ地震 ($M=8.4$) の場合には、この地震に伴った地殻変動をもとに、 $L=600$ km, $W=200$ km, $\delta=10^\circ$, $\bar{D}=16$ m の値が求められている^{33), 34)}。このような静的断層モデルは、地震前後の地殻変動測量データが存在する多くの大地震について得られているが、さらにプレート沈み帯の海岸付近で起った大地震の場合には、沿岸で観測された津波の波高分布、海岸の上下変動、震度分布などもデータとして用いられ、過去の歴史地震についても断層モデルが与えられるようになった。日本列島周辺では1944年東南海、1946年南海道両地震のほか、南海・相模トラフ沿いの巨大地震についてモデルが推定されている³⁵⁾。

6.2 動的断層モデル

一方、地震波は断層形成の動的部分を反映するから、 P 波や S 波などの実体波およびRayleigh波、Love波などの表面波の観測から、断層の動的パラメータ、すなわち断層面内の破壊フロントの伝播速度 (v) と断層面上の各点でのすべり継続時間 (τ) (ライズ・タイム)、あるいは断層面のすべり速度 $D (=D/\tau)$ が推定される。1969年Haskellは³⁶⁾、無限均質弾性体中に矩形断層 (長さ L , 幅 W) を考え、その一端から幅全体に亘って破壊が始まり、一定の速度で一方向へ伝播する単純化したモデルを与え、断層近傍を含む媒質内各点での変位を計算した。このモデルは後にHaskellモデルと呼ばれ、変位の表現式は異なるが、本質的にはMaruyama²³⁾ やBurridge & Knopoff²⁴⁾ と同等であり、その特別な場合と見なすことが出来る。同様なモデルはdouble couple点震源の重ね合わせとしても扱われ、震源より遠方の点における P 波と S 波の変位が時間領域と周波数領域で表現され³⁷⁾、特に破壊伝播速度とライズ・タイムが振幅スペクトラムと振幅の方位分布に及ぼす影響について詳しい検討が行われた。上のモデルは何れも無限弾性体中のものであるが、地表面の影響を考慮した半無限弾性体内³⁸⁾ や水平成層構造中に断層がある場合にも拡張された。後者の場合に対しては、一般波線理論³⁹⁾、多重反射波法⁴⁰⁾、反射率法^{41), 42)}、正規モード法⁴³⁾、離散波数法⁴⁴⁾、DWFE法^{45), 46)}などの種々の方法が用いられた。

先に述べた静的および動的断層パラメータが与えられれば、地震を発生させる断層運動が規定され、上の何れかの定式にしたがって、任意の地点における理論地震波形の計算が可能である。こうして、多くの観測点で観測された地震波形とこれらの理論波形の比較から逆に断層パラメータが推定された。日本列島周辺

と内陸部の主要な地震や、世界各地の大地震については殆どこれらのパラメタが推定され、Kanamori & Anderson⁴⁷⁾, Purcaru ら⁴⁸⁾, 佐藤⁴⁹⁾らによってまとめられている。前者のうち海溝付近のプレート沈み帯の地震としては、1923年関東、1933年三陸、1938年塩屋沖、1940年積丹沖、1952年十勝沖、1958・1963年エトロフ沖、1968年日向灘、1968年豊後水道、1968年十勝沖、1973年根室沖、1978年宮城沖、1978年伊豆大島近海、1980年伊豆半島東方沖、1982年浦河沖、1983年日本海中部などの地震、内陸部の地震としては1891年濃尾、1927年丹後、1931年西埼玉、1943年鳥取、1948年福井、1961年北美濃、1963年越前岬沖、1964年新潟、1968年埼玉、1969年岐阜県中部、1970年秋田県南東部、1974年南伊豆、1983年鳥取県中部、1984年長野県西部などの地震がある。

7. 断層パラメタと地震の相似則

1967年 Aki⁵⁰⁾は大・小地震間には第1近似的には形態特性の相似則が成立し、破壊伝播速度、断層すべり速度、応力降下量は地震の大きさによらず一定との仮定の下に、Haskellの統計モデル⁵¹⁾にもとづいてすべり速度の時間・空間自己相関関数を導入し、遠距離での地震波変位スペクトル密度一周波数の関係を導いた。このモデルでは、臨界周波数より高周波側ではスペクトルは角周波数 ω^{-2} に比例して減少することから ω^2 -モデルと呼ばれるが、臨界周波数より低周波側ではスペクトルは一定で地震モーメントに比例する。この場合の臨界周波数は断層の長さ L に比例し、モーメントは長さの3乗に比例する。その後上の関係は一部修正され、5 secより短周期側では ω^{-1} に比例するとされた⁵²⁾。一方、先の簡単なHaskellモデル³⁶⁾にもとづけば、遠方での変位スペクトルは ω^0 , ω^{-1} , ω^{-2} の3部分に分れることが指摘された⁵³⁾。さらに断層の長さ (L) 、幅 (W) 、ライズ・タイム (τ) の影響を含み破壊伝播を考慮した断層モデル^{37), 54)}に対して、 $W/L=C_1$, $\bar{D}/L=C_2$, $\beta\tau/L=C_3$ (β はS波速度、 C_1 , C_2 , C_3 はそれぞれ定数)の相似則⁴⁷⁾を導入すれば、遠方でのP波、S波の変位スペクトルは ω , ω^{-1} , ω^{-2} , ω^{-3} の4部分に分れ⁵⁵⁾、3つの臨界周波数 $\omega_{c1} \propto V_R/L$, $\omega_{c2} \propto \tau/L$, $\omega_{c3} \propto \beta/W$ を生ずることが明らかになっている。

またKanamori & Anderson⁴⁷⁾は多くの地震の断層パラメタの関係から上の相似則が成立し、 $\log M_0 \propto (3/2)\log S$ 、大部分の地震については表面波マグニチュード $M_S \propto \log L^2$ の関係が成立すること、したがって $M_0 \propto L^3$ の比例関係から $\log M_0 \propto (3/2)\log M_S$ が得られるが、津波地震のようにライズ・タイムが異常に長い巨大地震に対してはこの関係が $\log M_0 \propto 3 \log M_S$ となることを示した。

8. 深発地震のメカニズム

深発地震の存在は1935年、和達⁵⁶⁾によって初めて明らかにされ、その後のBenioffの研究⁵⁷⁾と合わせ、島弧下では深発地震面が海溝側より島弧側へ傾斜して入り込んでいることが見出された。深発地震の発震機構はすでに1950年代から本多ら^{58), 59)}によって調べられ、P波およびS波の放射パターンからdouble couple型メカニズムが主張されていた。また同時にこれから推定される震源での主圧力の水平成分が深発地震帯の走向に直交することも見出された。一方、世界各地の深発地震のメカニズムを調査したIsacks & Molnar⁶⁰⁾は、主圧力方向が深発地震面に平行なdown-dip compression (d. c.)、主張力方向がこの面に平行なdown-dip tension (d. t.)の両方があり、深発地震面が達する深さによって上部のみでd. t.、上部がd. t. で下部がd. c.、全体に亘ってd. c.の場合があることを示し、このような応力状態を生ずる力学的原因をプレートに働く重力とアスセノスフェアの深さによる強度の差との関係で論じた。また同様な議論はKanamori⁶¹⁾によってプレート沈み込みの進化の観点から行われ、モデルが提出された。しかし現在の高精度の観測によれば、いくつかのプレート沈み込み帯では、プレート上面付近と中心部よりやや上側の2つの部分には \searrow 平行する“二重深発地震面⁶²⁾”の存在が認められ、この両方で発生する地

震のメカニズムが異なることも見出されている⁶³⁾。

一方地震学的には1960年代終りから1970年代へかけて、さらに詳細な研究が行われ、深発地震の断層モデルが提出された。浅発地震の場合と同様、弾性体くいちがい理論にもとづき剪断型破壊モデルによりP波とS波の遠方観測点での変位を求め、さらに震源付近の構造、伝播経路中の波の拡散と減衰、観測点付近の地殻構造、地震計—記録システムのレスポンス等を考慮して理論波形を計算して、WWSSN観測網の長周期地震波形と比較する方法が取られた^{54), 64), 65)}。これらの研究から、P波とS波の波形は浅発地震の場合と同様の剪断破壊で説明され、また日本列島周辺、南米、インドネシア、トンガなどの多くの深発地震の断層パラメタが求められた^{66), 67)}。このうち応力降下量は浅発地震の場合に比べてかなり大きく100～1,000バールの範囲にあり、深さと共に増大する傾向のあることが指摘されている⁶⁸⁾。

一方、深発地震を発生させる物理的メカニズムに関しても1950年代から多くの議論が行われた。すなわち深発地震が起る100～600kmでは静水圧が30～210kbに達し摩擦すべりは起り得ず、また1000～1500℃の高温下では岩石は塑性流動を起し、脆性破壊は発生し得ないと考えられたからである。これに代る機構として、Orowanら⁶⁹⁾の塑性変形クリープの不安定、Griggo & Handin⁷⁰⁾、Griggo-Baker⁷¹⁾らによる固体—液体相転移あるいは熱的に加速されたクリープによる剪断溶融、Raleigh & Patterson⁷²⁾の岩石中の含水鉱物の高温・高圧下における脱水作用による脆性化、Ringwood⁷³⁾によるプレート内の相変化による体積減少などが提唱された。さらに最近では多結晶不安定、多相転移、anti-crackモデル、リソスフェア中の脱水作用による水の循環などのメカニズムが提唱されている。

9. 波形インバージョン

1980年代へ入ると、観測された地震波形を用い、インバージョンによって断層面解や地震モーメント、あるいは断層面上のりり量分布や破壊フロントを決定する研究が行われるようになった。

9.1 モーメント・テンソル・インバージョン

点震源力源モデルにおいて、互に直交する3軸に沿う力によるモーメントの大きさを $M_{kl}(t)$ で表現すると、これら9成分はテンソル量であり、これらが震源に働く場合の変位を計算することが出来る。(k≠lの場合 M_{kl} は互に反対方向に働く1組の偶力であり、さらにこれと直交するもう1組の偶力 M_{lk} を与えればdouble coupleとなり、剪断破壊に相当する。k=lの場合はこの軸に沿って互に反対方向に働く圧縮力または引張り力を表わす。)多くの観測点で記録された観測波形からこれら3つの主軸方向とモーメントの大きさを決定するモーメント・テンソル・インバージョンは1974年以降Dziewonski & Gilbert⁷⁴⁾、Gilbert & Dziewonski⁷⁵⁾によって始められたが、現在ではグローバル地震観測網のデータを利用し、 $M_s > 5.5$ の地震に対して改良されたCMT法を適用してルーチ的にモーメントが決められるようになった⁷⁶⁾。この結果、深発地震を含む殆どの地震のメカニズムはdouble coupleモデル(DC)で説明されることが明らかになった。しかし稀にはこれ以外の非double couple成分(NDC)が見出される地震もあり⁷⁷⁾、その原因としては複数個のDCタイプの地震が連続して発生する場合や、実際に急激な相転移によって体積収縮が存在する可能性などが考えられている。マグマ貫入によってクラックが開いたtension crack⁷⁸⁾の場合にはP波初動は円錐型分布を示すことがあり得る。

9.2 震源過程インバージョン

大地震の際に観測される波形は、断層モデルによって計算された実体波の理論波形によってかなり良く説明されるが、さらに複雑な高周波の波動が含まれることが明らかになって来た。これら高周波波動の発生の原因としては、地殻構造の不均質性の他に、断層の破壊過程自体の複雑さが考えられる。後者には多

重震源や小破壊の連続発生^{79), 80)}, 破壊進行の不規則性⁸¹⁾などが指摘された。1980年代にはこのような震源過程を明らかにするために種々の方法による地震波形のインバージョンが行われた。このインバージョンは、震源過程を多くの小断層（要素）の破壊の集合から成ると考え、観測波形と理論波形の差の二乗和を最小にするように各要素の破壊時刻、スリップ量またはモーメント、破壊継続時間などを未知量として種々の方法で決定することにある。理論波形の計算には、波線理論や離散波数法あるいは小地震の観測記録^{82), 83)}を用いて地殻構造に対するグリーン関数が計算される。観測データとしては遠地観測点での長周期波形を用いた場合^{84)–88)}, 近地観測点での強震動波形を用いた場合^{90)–99)}, これらの両者を組合わせた場合⁹¹⁾などがある。

この結果、得られた断層変位またはモーメント解放量や破壊の進行、パターンにはかなりの非一様性が存在することが見出された。例えば大破壊へ成長する前の初期破壊⁷⁹⁾や断層の端付近でのサブイベントの存在⁸⁷⁾, 断層の屈曲による破壊の一時停止⁹³⁾などがあり、これらは断層面上あるいは周辺の強度の不均質性に起因するものと考えられる。これを説明するためにバリア・モデル^{100), 101)}とアスペリティ・モデル¹⁰²⁾が提出されている。また巨大地震の場合には、小破壊の集合のみならず、さらに長い時定数の破壊を含んだ階層的構造が存在することも示唆されている⁸⁹⁾。

10. 断層破壊過程と動力学的モデル

先に述べた“くいちがい理論”にもとづく断層モデルはいわば運動学的モデルであって、観測結果を説明するように破壊の進行速度やパターン、断層り形成の時間関数、断層面上の変位の空間分布などが推定された。しかし弾性体内での断層運動は、断層面上と周辺での応力—歪関係とエネルギー収支など力学的条件の下で起るため、上のパラメタは任意に定められるものではなく、相互に関係がある筈である。このような立場から1960年代後半以降、媒質内の初期応力と断層面上の強度、摩擦応力を考慮した動的剪断クラックの伝播問題が研究された^{103)–114)}。動的破壊の自然伝播を規定する重要な要素はクラック先端の破壊基準である。2次元クラックの伝播を扱ったIda¹⁰⁸⁾, Andrews¹⁰⁹⁾らはこの基準に先端での摩擦応力が変位の増大とともに減少するslip-weakeningモデルを導入し、Das & Aki¹¹⁰⁾らは先端の応力が一定強度を超えた場合に破壊を生ずる臨界応力基準を用いた。前者はクラック先端付近の破断域が小さい場合にはGriffithの基準に対応し、後者は応力拡大係数を用いるIrwinの基準にほぼ近い。Das & Aki¹⁰⁰⁾は一樣な初期応力の下で強度が不均一な2次元断層内の破壊伝播問題を扱い、強度が高い一定の幅のバリアが存在すると伝播が遅れたり、これが未破壊のまま残ることを示し、遠方での実体波の変位スペクトラムの形状が変ることなどを明らかにした。

3次元媒質内の剪断クラックの自然伝播問題はMikumo & Miyatake¹¹¹⁾, Miyatake¹¹²⁾, ほか^{113), 114)}により前に述べた後者の破壊基準を用いて扱われた。これらの研究から、断層の摩擦強度が一定または不均質性が小さく、初期応力より僅かに高い場合は、最低強度の場所より始まった破壊は応力方向にはP波に近い速度で、これと直角方向にはS波に近い速度で楕円形状のフロントを持って伝播し、初期応力が平均強度よりかなり低い場合にはS波に近い速度で円形状になること；種々の波長と強度を持つ不均質性が高い断層では、破壊伝播速度が低下し、破壊フロントの形状が不規則になること；特に強度が高いバリアが存在すると破壊を一時的に停止させ、あるいは未破壊領域として残ること；などが明らかになった。このような不均質度の高いバリア・モデルでは残留応力の非一様性が高く、特に未破壊領域の周辺では応力集中が起るため、余震発生の原因となること¹¹⁵⁾, さらに長期的には群発的地震活動の集中化、活動の静穏化、前震発生などが発生し得ることなど¹¹⁶⁾が明らかになった。一方、このような3次元クラック伝播問題はアスペリティ・モデルに対しても研究され、断層面内に存在する強度が比較的高く面積の大きいアスペリティの破壊が断層全体の主破壊を生ずる場合のあることが示された¹¹⁷⁾。

3次元クラック伝播の研究は、さらに水平成層構造やさらに複雑な3次元不均質構造中の垂直横ずれ断層¹¹⁸⁾や傾斜する逆断層¹¹⁹⁾の破壊過程にも拡張され、また岩石の剪断強度や応力降下量、初期応力分布が深さとともに変化する大陸地殻内の断層破壊にも拡大している¹²⁰⁾。

11. 断層強度と応力の不均質性

先の地震観測波形を用いた震源過程インバージョンの結果と、動学的断層破壊過程の結果を直接比較して、強度と応力の不均一性を推定しようとする研究が最近行われるようになった^{118, 121)}。さらに具体的には波形インバージョンによって求められた断層面上各点での変位量と破壊到達時間の分布から、3次元クラック・モデルによって逆に断層上の強度と初期応力分布を推定する試みである。このため先づインバージョンによる破壊到達時間を断層面上各点での破壊基準に置き換え、破壊直前の最大剪断応力をその点での断層強度の下限とする¹²²⁾。次に応力平衡条件を境界条件の下で解くことによりインバージョンによる断層各点の変位から静的応力降下量を直接求める¹²²⁾か、あるいは断層各点に応力降下量を次々に与え、動的破壊伝播による変位とインバージョンから得られた変位の差の二乗和を最小にするよう計算を繰り返す¹¹⁹⁾何れかの方法が採られる。このようにして断層面内の超過強度(最大剪断強度と初期応力との差)および応力降下量(初期応力と迂り摩擦応力の差)の分布が得られる。Miyatake^{122, 123)}は前者の方法により1973年Imperial valley地震と日本内陸部の4個の横ずれ断層地震について断層の強度-応力分布を推定した。またMikumo & Miyatake¹¹⁹⁾は1961年北米濃地震の傾斜逆断層上の強度-応力関係を後者の方法によって推定した。Fig. 2は上から(a) 応力降下量分布、(b) 超過強度分布(単位は何れもbar)およびこの両者の比((b)/(a))を示し、Fig. 3はこれらの条件下での動的破壊進行のパターンを示す。これから初期破壊(断層面右端に近い部分)では初期応力が三角形のかなり広い領域で断層強度に近付き、こゝで破壊が開始し断層面の上部と下部で応力降下量の大きいアスぺリティ型破壊を生じ、次いで断層左上から中央下部へかけて強度が高いバリア型破壊を生じたことが明らかになった。

また一様な応力と強度の下で動的破壊モデルから期待される断層迂り時間関数と最終変位分布および破壊到達時間を力学的拘束条件下の初期値として、地震波形インバージョンを行ってこれらの運動学的パラメタの第1次値を求め、次にこれを先の方法によって変換して断層強度と応力分布を推定し、この2種のインバージョンを繰り返して最終モデルを得る方法も試みられ、1990年の伊豆大島地震に適用された¹²⁴⁾。

このような方法によって将来は多くの地震を発生させた断層の強度分布や初期応力分布について詳しい

1961 Kita-Mino Earthquake

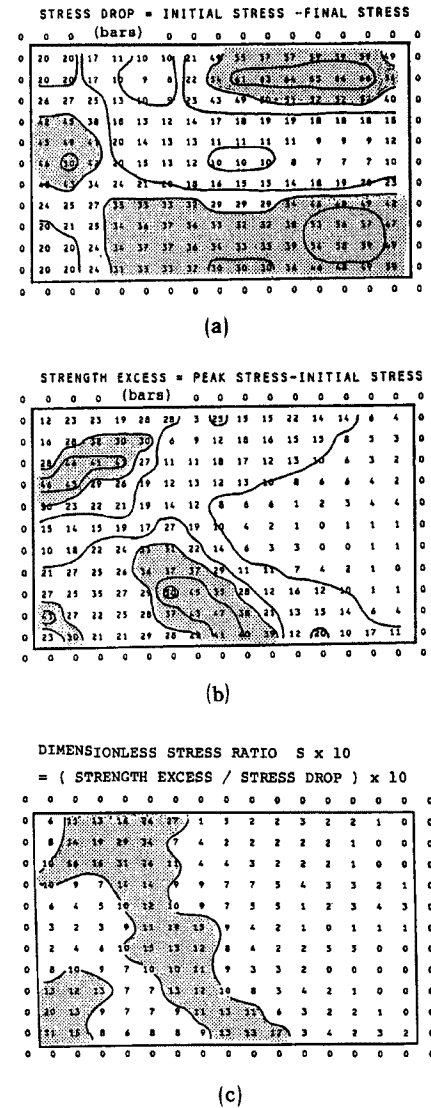


Fig. 2. Distribution of (a) dynamic stress drop, (b) strength excess, and (c) dimensionless stress ratio $S=(b)/(a)$. (after Mikumo & Miyatake, 1992).

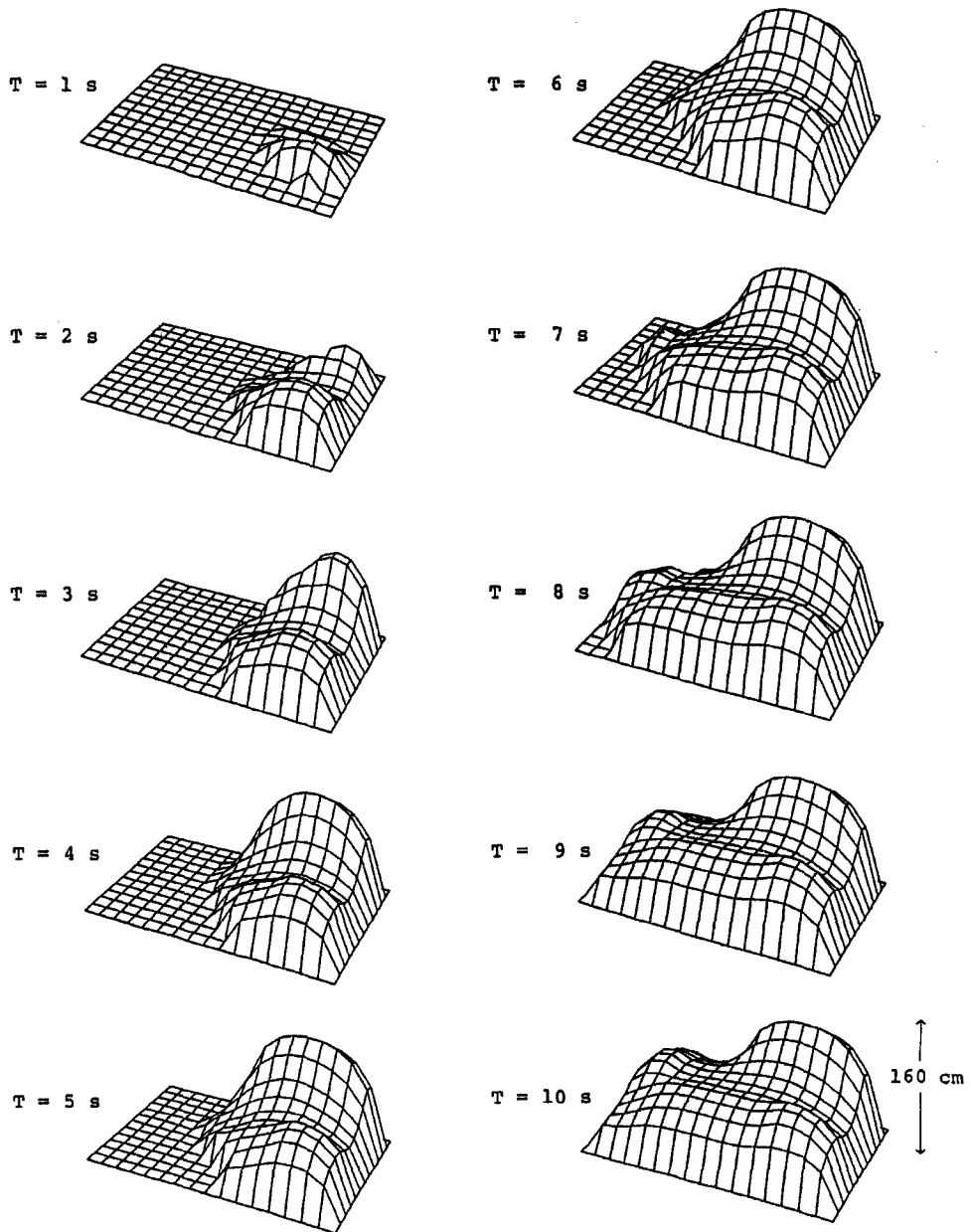


Fig. 3. A perspective view of the temporal patterns of dynamic rupture propagation and fault slip derived from 1961 Kita-Mino earthquake (after Mikumo & Miyatake, 1992).

情報が得られることが期待される。

12. 断層の摩擦構成則と破壊核の形成

地殻および上部マントル内部で発生する地震の大部分が断層の急激なすべりによって発生する以上、断層面の摩擦特性と動的破壊に先行する破壊核の形成過程は地震発生に重要な意味を持つ。この特性を理解

するための岩石の摩擦すべりの実験が1960年後半から行われ、急激な固着—すべりに先行して準静的安定すべりが存在することが認められていた^{125, 126)}。1978年 Dieterich¹²⁷⁾ は実験結果にもとづき、静摩擦力が固着時間の対数に比例して増大し、動摩擦力がすべり速度の増加とともに減少する摩擦法則を提唱した。その後この摩擦法則は、急激な速度増加に対する摩擦力のステップ的増加とその後の対数的減少を含む構成則に改められ、また Ruina¹²⁸⁾ はほぼ同様な速度応答を持つ構成則を与え、両者を合わせて“状態—速度依存摩擦構成則”と呼ばれる。この構成則は岩石実験で見出された先行不安定すべりを説明するが、実験でのり速度がある範囲に限定されているため実際の断層運動に適用し得るかどうかは必ずしも保証されない。またこれとは独立に大型岩石試料による実験から、摩擦応力がすべり開始とともに急激に増大して最大値に達した後、すべり変位の増加にしたがって減少する Slip-weakening が見出され¹²⁹⁾、これを説明する構成則が提出された¹³⁰⁾。これは動的クラック先端の破壊基準として用いられた法則¹⁰⁹⁾を裏付けるものである。またこの構成則は実験で得られた動的破壊に先立つ準静的すべりを説明出来るが、すべり破壊終了後の強度回復過程を説明することが難しい。

一方、これらの摩擦構成則を考慮した断層運動のモデル化も行われた。この結果、状態速度依存則あるいはり量依存則を導入した2次元または3次元断層破壊モデルでは、何れの場合も破壊核の形成と準静的すべりが動的破壊に先行することが見出された¹³¹⁻¹³³⁾。この破壊核形成域の大きさとすべり変位は、構成則を支配する臨界り量にほぼ比例する¹³⁴⁾。

実際の断層について地震学的に推定されている臨界り量は20～150 cm程度¹³⁵⁾で、岩石の場合の $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ cm}^{136)$ き比べてかなり大きいため、破壊核形成に伴う前兆的歪を観測から検出することは不可能ではないであろう。

13. お わ り に

以上、地震発生機構の研究の進展をふり返って来た。特に11と12の結果は今後の地震予知研究に密接に関係するため、その進展を期待したい。

参 考 文 献

- 1) Honda, H.: On the initial motion and the types of the seismograms of the North Idu and the Ito earthquakes, *Geophys. Mag.*, 4, 1931, pp.185-213.
- 2) Ishimoto, M.: Existence d'une source quadruple au foyer sismique d'apres l'etude de la distribution des mouvements initiaux des secousses sismiques, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 10, 1932, pp.449-471.
- 3) Mikumo, T.: A consideration on generation mechanism of local earthquakes, *Mem. Coll. Sci. Kyoto Univ.*, Ser. A, 29, 1959, pp.221-240.
- 4) Nakano, H.: Notes on the nature of the forces which give rise to the earthquake motions, *Seismol. Bull. Centr. Meteorol. Obs., Japan*, 1, 1923, pp.92-120.
- 5) Honda, H.: Earthquake source mechanism and seismic waves, *Geophys. Notes, Yokyo Univ.* 15, Suppl., 1962, 97 pp.
- 6) Byerly, P.: The Montana earthquake of June 28, 1925, *G. M. C. T., Bull. Seismol. Soc. Am.*, 16, 1926, pp.209-265.
- 7) Honda, H.: The generation of seismic waves, *Pub. Dominion Obs. Ottawa*, 24, 1960, pp.329-334.
- 8) Kasahara, k.: Radiation mode of S waves from a deep-focus earthquake as derived

- from observations, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 53, 1963, pp.643-659.
- 9) Stauder, W.: S waves and focal mechanisms: The state of the question, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 50, 1960, pp.333-346.
 - 10) Keylis-Borok, V. I., The determination of earthquake mechanism, using both longitudinal and transverse waves, *Ann. di Geofis.*, 10, 1957, pp.105-128.
 - 11) Mikumo, T., Mechanism of local earthquakes in Kwanto region, Japan, derived from the amplitude relation of P and S waves, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 40, 1962, pp.399-424.
 - 12) Aki, K.: Study of earthquake mechanism by a method of phase equalization applied to Rayleigh and Love waves, *J. Geophys. Res.* 65, 1960 a, pp.729-740.
 - 13) Aki, K.: Interpretation of source functions of circum-Pacific earthquakes from long-period Rayleigh waves, *J. Geophys. Res.* 65, 1960 b, pp.2405-2417.
 - 14) Brune, N.: Radiation pattern of Rayleigh waves from the southeast Alaska earthquake of July 10, 1958, *Pub. Dominion Obs. Ottawa*, 24, 1960, pp.373-383.
 - 15) Reid, H.F.: The elastic rebound theory of earthquakes, *Univ. Calif. Publ. Geol. Sci.*, 6, 1911, pp.413-444.
 - 16) Tocher, D.: Earthquake energy and ground breakage, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 48, 1958, pp.147-152.
 - 17) Iida, K.: Earthquake energy and earthquake fault, *J. Earth Sci., Nagoya Univ.*, 7, 1959, pp.98-107.
 - 18) Kasakara, K.: The nature of seismic origins as inferred from seismological and geodetic observations (1), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 1957, pp.473-532.
 - 19) Knopoff, L.: Energy release in earthquakes, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 1, 1958, pp.44-52.
 - 20) Chinnery, M.A.: The deformation of the ground around surface faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 51, 1961, pp.355-372.
 - 21) Stekettee, J.A.: On Volterra dislocation in a semi-infinite medium, *Can. J. Phys.*, 36, 1958 a, pp.192-205.
 - 22) Stekettee, J.A.: Some geophysical applications of the elasticity theory of dislocations, *Can. J. Phys.* 36, 1958 b, pp.1168-1198.
 - 23) Maruyama, T.: On the force equivalents of dynamical elastic dislocations with reference to the earthquake mechanism, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 41, 1963, pp.467-486.
 - 24) Burridge, R. and Knopoff, L.: Body force equivalence for seismic dislocations, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 54, 1964, pp.1875-1888.
 - 25) Maruyama, T.: Static elastic dislocation in an infinite and semi-infinite medium, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 42, 1964, pp.289-368.
 - 26) Press, F.: Displacements, strains, and tilts at teleseismic distances, *J. Geophys. Res.* 70, 1965, pp.2395-2412.
 - 27) Mansinha, L. and Smylie, D.E.: The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 61, 1971, pp.1433-1440.
 - 28) Sato, R. and Matsu'ura, M.: Strains and tilts on the surface of a semi-infinite medium, *J. Phys. Earth*, 22, 1974, pp.6410-6418.
 - 29) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull.*

- Seismol. Soc. Am., 75, 1985, pp.1135-1154.
- 30) Aki, K., Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from G wave spectrum, Bull. Earthq. Res. Inst., 44, 1966, pp.73-88.
 - 31) Aki, K.: Seismic displacements near a fault, J. Geophys. Res. 73, 1968, pp.5359-5375.
 - 32) Ando, M., A fault-origin model of the great Kanto earthquake of 1923 as deduced from geodetic data, Bull. Earthq. Res. Inst., 49, 1971, pp.19-32.
 - 33) Savage, J.C. and Hastie, L.M.: Surface deformation associated with dip-slip faulting, J. Geophys. Res., 71, 1966, pp.4897-4904.
 - 34) Plafker, G.: Alaskan earthquake of 1964 and Chilean earthquake of 1960: Implications for arc tectonics, J. Geophys. Res., 77, pp.901-925.
 - 35) Ando, M.: source mechanism and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai trough, Japan, Tectonophysics 27, 1975, pp.119-140.
 - 36) Haskell, N.: Elastic displacement in the near-field of a propagating fault, Bull. Seismol. Soc. Am., 59, 1969, pp.869-909.
 - 37) Hirasawa, T. and Stauder, W.: On the seismic body waves from a finite moving source, Bull. Seismol. Soc. Am., 55, 1965, pp.237-262.
 - 38) Kawasaki, I., Suzuki, Y. and Sato, R.: Seismic waves due to a shear fault in a semi-infinite medium, Part 2., J. Phys. Earth 23, 1975, pp.43-61.
 - 39) Helmberger, D.V.: The crust-mantle transition in the Bering Sea, Bull. Seismol. Soc. Am., 58, 1968, pp.179-214.
 - 40) Sato, R.: Long-period surface velocities and accelerations due to a dislocation source model in a medium with superficial multi-layers, J. Phys. Earth, 25, 1977, pp.43-68: 26, 1978, pp.17-37.
 - 41) Kennett, B.L.N.: Reflections, rays and reverberations, Bull. Seismol. Soc. Am., 64, 1974, 1685-1696.
 - 42) Kennett, B.L.N. and Kerry, N.J.: Seismic waves in a stratified half space, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 57, 1979, pp.557-583.
 - 43) Kawasaki, I.: The near-field Love waves by the exact ray method, J. Phys. Earth 26, 1978, pp.211-237.
 - 44) Bouchon, M.: A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, Bull. Seismol. Soc. Am., 71, 1981, pp.959-971.
 - 45) Alekseev, A.S. and Mihailenko, B.G.: Solution of dynamic problems of elastic wave propagation in inhomogeneous media by a combination of partial separation of variables and finite difference method, J. Geophys. 48, 1980, pp.161-172.
 - 46) Olson, A.H.: Forward simulation and linear inversion of earthquake ground motions, Ph. D. thesis, Univ. California, San Diego, 1971.
 - 47) Kanamori, H. and Anderson, D.L.: Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seismol. Soc. Am., 65, 1975, pp.1073-1095.
 - 48) Purcaru, G. and Berckhemer, H.: Quantitative relations of seismic source parameters and an attempt for the classification of earthquakes, Tectonophysics, 84, 1982, pp.57-128.
 - 49) Sato, R. (Editor): Handbook for Seismic Fault Parameters of Japanese Earthquakes,

- Kajima Publ. Ltd. 390 pp. (in Japanese).
- 50) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.* 72, 1967, pp.1217–1231.
 - 51) Haskell, N.A.: Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. Part II. A statistical source model, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 56, 1966, pp.125–140.
 - 52) Aki, K.: Scaling law of earthquake source function, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 31, 1972, pp. 3–25.
 - 53) Savage, J.C.: Relation of corner frequency to fault dimensions, *J. Geophys. Res.*, 77, 1972, pp.3788–3795.
 - 54) Mikumo, T.: Long-period P waveforms and the source mechanism of intermediate earthquakes, *J. Phys. Earth*, 17, 1969, pp.169–192.
 - 55) Geller, R.: Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 66, 1976, pp.1501–1523.
 - 56) Wadati, K.: On the activity of deep-focus earthquakes in the Japan Islands and neighbourhoods, *Geophys. Mag.* 8, 1935, pp.305–325.
 - 57) Benioff, H.: Orogenesis and deep crustal structure – additional evidence from seismology, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 65, 1954, pp.385–400.
 - 58) Honda, H. and Masatsuka, A.: On the mechanism of the earthquakes and the stresses producing them in Japan and its vicinity, *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, Ser. 5, 4, 1952, pp. 42–60.
 - 59) Honda, H., Masatsuka, A. and Emura, K.: On the mechanism of the earthquakes and the stresses producing them in Japan and its vicinity (2nd Paper), *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, Ser. 5, 8, 1956, pp.186–205.
 - 60) Isacks, B.L. and Molnar, P.: Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal mechanisms solutions of mantle earthquakes, *Rev. geophys.* 9, 1971, pp.103–174.
 - 61) Kanamori, H.: Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications, in “Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back Arc Basins”, eds. M. Talwani and P.W. Pitman III, *Amer. Geophys. Union*, 1977, pp.163–174.
 - 62) Hasegawa, A., Umino, N. and Takagi, A.: Double-planed structure of the deep seismic zone in the northeastern Japan arc, *Tectonophysics*, 47, 1978, pp.43–58.
 - 63) Umino, N. and Hasegawa, A.: A detailed structure of the deep seismic zone and earthquake mechanism in the northeastern Japan arc, *Zisin II*, 35, 1982, pp.237–257. (in Japanese).
 - 64) Berckhemer, H. and Jacob, K.H.: Investigation of the dynamical process in earthquake foci by analyzing the pulse shape of body waves, *Proc. Xth Assembly, ESC*, 1968 II, 1970, pp.253–352.
 - 65) Fukao, Y.: Focal process of deep-focus earthquakes as deduced from long-period P and S waves, *Bull. Earthq. Res. Inst.* 48, 1970, pp.707–727.
 - 66) Fukao, Y.: Source process of a large deep-focus earthquake and its tectonic implications; the western Brazil earthquake of 1963, *Phys. Earth & Planet. Intr.*, 5, 1972, pp.61–76.
 - 67) Abe, K.: Mechanisms and tectonic implications of the 1966 and 1970 Peru earthquakes,

- Phys. Earth & Planet. Intr., 5, 1972, pp.110-122.
- 68) Mikumo, T.: Focal process of deep and intermediate earthquakes around Japan as inferred from long-period P and S waves, *Phys. Earth & Planet. Intr.*, 6, 1972, pp.293-299.
 - 69) Orowan, E.: Mechanism of seismic faulting, *Geol. Soc. Am., Mem.*, 79, 1960, pp.323-345.
 - 70) Griggs, D. T. and Handin, J.: Observations on fracture and a hypothesis of earthquakes, *Geol. Soc. Am.*, 79, 1960, pp.347-364.
 - 71) Griggs, D. T. and Baker, D. W.: The origin of deep-focus earthquakes, in "Properties of Matter under Unusual Conditions", eds. H. Mark and S. Fernbach, Wiley Intersciences, 1969, New York, pp.23-42.
 - 72) Raleigh, C. B. and Patterson, M. S.: Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications, *J. geophys. Res.* 70, 1965, pp.3965-3985.
 - 73) Ringwood, A. E.: Phase transformations and mantle dynamics, *Earth & Planet. Sci. Lett.*, 14, 1972, pp.233-241.
 - 74) Dziewonski, A. M. and Gilbert, F.: Temporal variation of the seismic moment tensor and the evidence of precursive compression for two deep earthquakes, *Nature*, 247, 1974, pp.185-188.
 - 75) Gilbert, F. and Dziewonski, A. M.: An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra, *Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A*, 278, 1975, pp.187-269.
 - 76) Dziewonski, A. M., Chou, A. T. and Woodhouse, J. H.: Determinations of earthquake source parameters from waveform data for study of global seismicity: Centroid moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes in 1981, *J. Geophys. Res.* 88, 1981, pp.3247-3271.
 - 77) Knopoff, L. and Randall, M. J.: The compensated linear vector dipole: A possible mechanism for deep earthquakes, *H. Geophys. Res.*, 75, 1970, pp.4957-4963.
 - 78) Aki, K.: Evidence for magma intrusion during the Mammoth Lake earthquake of May 1980 and implications of the absence of volcanic (harmonic) tremor, *J. Geophys. Res.*, 89, 1984, pp.7689-7696.
 - 79) Umeda, Y.: An earthquake source model with a ripple generating core, *J. Phys. Earth*, 29, 1981, pp.341-370.
 - 80) Kanamori, H. and Stewart, G. S.: Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976, *J. Geophys. Res.*, 83, 1978, pp.3427-3434.
 - 81) Imagawa, K., Mikami, N. and Mikumo, T.: Analytical and semiempirical synthesis of near-field seismic waveforms for investigating the rupture mechanism of major earthquakes, *J. Phys. Earth*, 32, 1984, pp.317-338.
 - 82) Hartzell, S. H.: Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.*, 5, 1978, pp.1-4.
 - 83) Irikura, K.: Semi-empirical estimations of strong ground motions during large earthquakes, *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 33, 1983, pp.63-104.
 - 84) Kikuchi, M. and Kanamori, H.: Inversion of complex body waves, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1982, pp.491-506; *Phys. Earth & Planet. Intr.*, 43, 1986, pp.205-222.

- 85) Ruff, L. and Kanamori, H.: The rupture process and asperity distribution of three great earthquakes from long-period diffracted P-waves, *Phys. earth & Planet. Intr.*, 31, 1983, pp.202-230.
- 86) Nabalek, J.: Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves, PhD. thesis, Mass. Inst. Tech., Cambridge, 1984, 361 pp.
- 87) Kikuchi, M. and Fukao, Y.: Iterative deconvolution of complex body waves from great earthquakes - The Tokachi-Oki earthquake of 1986, *Phys. Earth & Planet. Intr.*, 37, 1985, 235-248.
- 88) Kikuchi, M. and Fukao, Y.: Inversion of long-period P-waves from great earthquakes along subduction zones, *Tectonophysics*, 144, 1987, pp.231-247.
- 89) Fukao, Y. and Furumoto, M.: Hierachy in earthquake size distribution, *Phys. Earth & Planet. Intr.*, 10, 1985, pp.355-368.
- 90) Olson, A.H. and Apsel, R.J.: Finite faults and inverse theory with applications to the 1979 Imperial Valley earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1982, pp.1969-2001.
- 91) Hartzell, S.H. and Heaton, T.H.: Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 73, 1983, pp.1553-1583.
- 92) Spudich, P. and Frazier, L.N.: Use of ray theory to calculate high-frequency radiation from earthquake sources having spatially variable rupture velocity and stress drop, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 74, 1984, pp.2061-2082.
- 93) Fukuyama, E. and Irikura, K.: Rupture process of the 1983 Japan Sea (Akita-Oki) earthquake using a waveform inversion method, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 76, 1986, pp.1623-1679.
- 94) Takeo, M.: An inversion method to analyze the rupture process of earthquakes using near-field seismograms, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77, 1987, pp.490-513.
- 95) Takeo, M.: Rupture process of the 1980 Izu-Hanto-Oki earthquake deduced from strong motion seismograms, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 78, 1988, pp.1074-1091.
- 96) Takeo, M. and Mikami, N.: Inversion of strong motion seismograms for the rupture process of the Nagano-Ken-Seibu earthquake of 1984, *Tectonophysics*, 144, 1987, pp.271-285.
- 97) Beroza, G.C. and Spudich, P.: Linearized inversion for fault rupture behavior; application to the 1984, Morgan Hill, California, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 93, 1988, pp.6275-6296.
- 98) Fukuyama, E.: Analysis and interpretation of the heterogeneous rupture process: application of the empirical Green's function method and nonlinear inversion technique to large earthquakes, *Tectonophysics*, 197, 1991 a, pp.1-17.
- 99) Fukuyama, E.: Inversion for the rupture details of the 1987 east Chiba earthquake, Japan, using a fault model based on the distribution of relocated aftershocks, *J. Geophys. Res.*, 96, 1991 b, pp.8205-8217.
- 100) Das, S. and Aki, K.: Fault plane with barriers: A versatile earthquake model, *J. Geophys. Res.*, 82, 1977 b, pp.5658-5670.
- 101) Aki, K.: Characterization of barriers on an earthquake fault, *J. Geophys. Res.*, 84, 1979, pp.6140-6148.

- 102) Kanamori, H.: The nature of seismicity pattern before large earthquakes, in "Earthquake prediction - an International Review", Maurice Ewing Series 4, Amer. Geophys. Union, 1981, pp. 1-19.
- 103) Kostrov, B.V.: Self-similar problems of propagation of shear cracks, *J. Appl. Math. Mech.*, 28, 1964, pp.1077-1087.
- 104) Kostrov, B.V.: Unsteady propagation of longitudinal shear cracks, *J. Appl. Math. Mech.*, 30, 1966, pp.1241-1248.
- 105) Burridge, R.: Admissible speeds for plane-strain shear crack with friction but lacking cohesion, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 35, 1973, pp.439-455.
- 106) Burridge, R. and Halliday, G.S.: Dynamic shear cracks with friction as models for shallow focus earthquakes, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 25, 1971, pp.263-283.
- 107) Ida, Y. and Aki, K.: Seismic source time function of propagating shear cracks, *J. Geophys. Res.*, 77, pp.2034-2044.
- 108) Ida, Y.: Stress concentration and unsteady propagation of longitudinal shear cracks, *J. Geophys. Res.*, 78, 1973, pp.3418-3429.
- 109) Andrews, D.J.: Rupture velocity of plane strain shear cracks, *J. Geophys. Res.*, 81, 1976, pp.5679-5987.
- 110) Das, S. and Aki, K.: A numerical study of two-dimensional rupture propagation, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 50, 1977 a, pp.643-668.
- 111) Mikumo, T. and Miyatake, T.: Dynamical rupture process on a three-dimensional fault with non-uniform frictions, and near-field seismic waves, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 54, 1978, pp.417-438.
- 112) Miyatake, T.: Numerical simulations of earthquake source process by a three-dimensional crack model, Part I, *J. Phys. Earth*, 28, 1980, pp.565-598.
- 113) Das, S.: Three-dimensional rupture propagation and implications for the earthquake source mechanism, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 62, 1980, pp.591-604.
- 114) Day, S.M.: Three-dimensional simulation of spontaneous rupture: The effect of non-uniform prestress, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1982, pp.1881-1902.
- 115) Mikumo, T. and Miyatake, T.: Earthquake sequences on a frictional fault model with non-uniform strengths and relaxation times, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 59, 1979, pp.497-522.
- 116) Mikumo, T. and Miyatake, T.: Numerical modelling of space and time variations of seismic activity before major earthquakes, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 74, 1983, pp.559-583.
- 117) Das, S. and Kostrov, B.V.: Breaking of a single asperity: Rupture process and seismic radiation, *J. Geophys. Res.*, 88, 1983, pp.4277-4288.
- 118) Mikumo, T., Hirakara, K. and Miyatake, T.: Dynamical fault rupture processes in heterogeneous media, *Tectonophysics*, 144, 1987, pp.19-36.
- 119) Mikumo, T. and Miyatake, T.: Dynamic rupture processes on a dipping fault, and estimates of stress drop and strength excess from the results of waveform inversion, submitted to *Geophys. J. Intn'l.*, 1991.
- 120) Mikumo, T.: Dynamic rupture and stress recovery processes in continental crust under depth-dependent shear strength and frictional parameters, *Tectonophysics*, 1992

- (in press).
- 121) Quin, H.: Dynamic stress drop and rupture dynamics of the October 15, 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Tectonophysics*, 175, 1990, pp.93–117.
 - 122) Miyatake, T.: Reconstruction of dynamic rupture process of an earthquake with constraints of kinematic parameters, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1992, pp.349–352.
 - 123) Miyatake, T.: Heterogeneity of dynamic rupture processes of inland earthquakes in Japan – Weak and strong asperities, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 1992.
 - 124) Fukuyama, E. and Mikumo, T.: Dynamic rupture analysis: Inversion for the source process of the 1990 Izu–Oshima, Japan, earthquake (M 6.5), submitted to *J. Geophys. Res.*, 1991.
 - 125) Scholz, C.H., Molnar, P. and Johnson, T.: Detailed studies of frictional sliding of granite and implications for the earthquake mechanism, *J. Geophys. Res.*, 77, 1972, pp. 6392–6406.
 - 126) Dieterich, J.H.: Preseismic fault slip and earthquake prediction, *J. Geophys. Res.*, 83, 1978 a, pp.3940–3948.
 - 127) Dieterich, J.H.: Time–dependent friction and the mechanism of stick slip, *Pure Appl. Geophys.*, 116, 1978 b, pp.790–806.
 - 128) Ruina, A.: Slip instability and state variable friction laws, *J. geophys. Res.*, 88, 1983, pp.10359–10370.
 - 129) Ohnaka, M., Kuwahara, Y. and Yamamoto, K.: Constitutive relations between dynamic physical parameters near a tip of the propagating slip zone during stick–slip shear failure, *Tectonophysics*, 144, 1987, pp.109–125.
 - 130) Ohnaka, M. and Yamashita, T.: A cohesive zone model for dynamic shear faulting based on experimentally inferred constitutive relation and strong motion source parameters, *J. Geophys. Res.*, 94, 1989, pp.4089–4104.
 - 131) Miyatake, T.: Numerical simulation of three–dimensional faulting processes with heterogeneous rate– and state–dependent friction, *Tectonophysics*, 1992 (in press).
 - 132) Tullis, T.E.: Three dimensional modeling of strike slip earth–quakes using laboratory–based rate– and state–dependent constitutive laws, *Ext. Abstr. Intern'l. Symp. Earthq. Source Phys. & Earthq. Precursors*, 1990, pp.80–83.
 - 133) Matsu'ura, M., Kataoka, H. and Shibasaki, B.: Slip–dependent friction law and nucleation processes in earthquake rupture, *Ext. Abstr. Intern'l. Symp. Earthq. Source & Earthq. Source & Earthq. Precursors*, 1990, pp.69–73.
 - 134) Dieterich, J.H.: Nucleation and occurrence of earthquakes on faults with rate– and state–dependent fault strength, *Ext. Abstr. Intern'l. Symp. Earthq. Source Phys. & Earthq. Precursors*, 1990, pp.21–24.
 - 135) Aki, K.: Hierarchy of interrelations between seismogenic structures and earthquake processes, *Ext. Abstr. Intern'l. Symp. Earthq. Source Phys. & Earthq. Precursors*, 1990, pp. 3–6.
 - 136) Dieterich, J.H.: Constitutive properties of faults with simulated gouge, in “Mechanical Behaviors of Crystal Rocks” *Geophys. Monogr. Ser.* 24, eds N.L. Carter, M. Friedman, J.M. Logan and D.W. Stearns, *Amer. Geophys. Union*, 1981.

A REVIEW OF STUDIES ON THE EARTHQUAKE SOURCE MECHANISM

By *Takeshi* MIKUMO**Synopsis**

A number of investigations into the earthquake source mechanism, which have been made since 1930's to date, are reviewed here. It is hoped that deep understanding of the mechanism would be useful for more advanced studies in this field and for predicting large earthquakes in the future.