総 合 報 告

多重震源の解析

横浜市立大学文理学部物理教室* 菊 地 正 幸
(昭和 63 年 10 月 1 日受付; 昭和 63 年 10 月 25 日受理)

Analysis of Multiple Event Sources

Masayuki KIKUCHI

Department of Physics, Yokohama City University, Seto 22-2, Kanazawa-ku, Yokohama-shi, 236
(Recived October 1, 1988; Accepted October, 25, 1988)

This paper gives a review of studies on source complexity such as multiple event nature of great earthquakes. It includes a brief note to historical background as well as inversions of complex body waves which have recently been developed to extract informations about fault asperities or barriers. It is emphasized that the multiple event nature is colseely related to some rate-determining process, such as stable frictional-sliding, in the areas surrounding the asperities.

§ 1. はじめに

地震は地球内部で起こる一つの破壊現象である。地球内部はガラスなどと違って不均一であるから、そこで起こる破壊現象もぎくしゃくとしたものに違いない。実際、大地震の地震記象の複雑さはそのことを物語っている。小地震の記象は相対的に単純であるが、これは大地震と同じ周期帯域で見ればのことである。細かく見ればそれなりの複雑さを持っている。

このような複雑なデータを前に、震源を探る方法は 2 通りある。1 つは、破壊の時系列にはこだわらず平均値やばらつきなど破壊全体の統計的性質に研究の主眼を置くやり方、もう 1 つは、あくまで個々の破壊過程を追跡するやり方である。前者の典型的な例としては、周波数領域での振幅スペクトルの解析がある [たとえば GUSEV (1983), 小山 (1984), HOUSTON and KANAMORI (1986)]。この場合、振幅スペクトルは地震モーメントなどの決定論的な震源パラメータのほかに、確率論的震源パラメータとして、すべり運動の時空間上の相関を表す量 [AKI (1967), PAPAGEORGIOU (1983)] や、ゆらぎの量 [小山 (1983)]、あるいはフラクタル次元 [大内 (1988)] などをもって解釈される。これに対し、後者では、破壊の

時間経過や順番が何らかの意味で重要であろうとの考えが根底にあり、時間軸上での波形解析が中心となる。また、震源モデルも決定論的な側面が強い。

この報告では、主に、後者の立場から、多重震源モデル及び地震波形のインバージョン法を中心に話を展開する。

§ 2. 震源解析の基本事項

地震動に影響を与える因子は、大別して、① 震源の擾乱と② 媒質の伝達特性である。地震工学的な見地からは、②はさらに伝播経路と表層地盤構造の因子に分けられる。いずれにせよ、②は地球の内部構造に起因する因子であるので、多くの地震についての多くの観測点での記録があれば原理的には抽出可能である。また、一旦②が知られると、個々の地震記録から逆に個々の震源の情報抽出することが可能である (ただし、震源域の外側のみを見る限り①と②の境界は一意的でない)。実際にはデータの有限さと地下構造の複雑さを考えると、②の因子の完全正確な決定は望むべくもない。そこで、次善の策として、できるだけ②の影響の少ないデータを選択したり、①の未知数の数なるべく少なくする方法がとられる。その結果、同一の地震についても、観測データの種類や震源パラメータの設定の仕方によってしばしば

* 〒236 横浜市金沢区瀬戸 22-2

結果が異なる。

震源を定量化する試みの中で、一様なくいちがいがある一定の速さで一方向に伝播するという、いわゆるハスケルモデル [HASKELL (1969)] が大きな役割を演じてきた。ハスケルモデルは代表的に約 10 個のパラメータで表される (ただしすべてが独立ではない)。すなわち、断層面とすべりの方向 (ϕ, δ, λ_0)、地震モーメント (M_0)、くいちがい (D)、破壊面積 ($S=L \times W$)、破壊継続時間 ($\tau_p=L/v$)、ライズタイム (τ_r)、及び、破壊速度 (v) である。このモデルは、浅い中規模地震の実体波解析や、巨大地震についての長周期表面波の解析など、1960 年代末から 1970 年代前半にかけて精力的に行なわれた地震波解析において用いられた。こうしてハスケルモデルは巨視的震源パラメータを標準化する役目を果たした。なおこれらの震源パラメータは、ESHELBY (1957) の Inclusion の理論や BRUNE (1970) の実効応力モデルなどを基礎に、断層面上での応力変化や地震波動エネルギーといった、より力学的な量と関連づけられた [AKI (1972)]。

1970 年代前半までに得られた巨視的震源パラメータは、KANAMORI and ANDERSON (1975) によって整理された。それは、① 歪み降下 (D/L) ② 特性時間比 ($v\tau_r/L=\tau_r/\tau_p$) ③ 縦横比 (W/L) の 3 つを定数とする相似則の形にまとめられた。また、震源を一つの割れ目に見立て、その割れ目の面上で応力が瞬時に降下したとみなして地震波動エネルギーを計算すると、それが Gutenberg-Richter のマグニチュード・エネルギー関係式から得られる値と大局的に一致することが確かめられた [KANAMORI (1977)]。こうして少なくとも巨視的には、力学的に一貫性のあるモデルが完成したように見えた。

しかし、あとで見るような震源過程の微細構造を考慮するとき、上の経験則の解釈は必ずしも単純ではない。例えば、すべり運動を支配している局所応力場がかなり不均一のとき、平均的な応力降下が一定という経験則は何を意味するか。あるいはまた、波動エネルギーの評価についても問題がある。というのは、最近の研究によると、摩擦応力はすべり速度やくいちがい量に依存し、しかもその依存性がすべりの安定・不安定を規定する重要な因子となっている。このような場合の波動エネルギーは、応力が瞬時に降下したとして計算される値とはかなり異なる [RUDNICKI and FREUND, 1981] ので、上述した『波動エネルギーと応力降下の調和的な関係』が何を意味するのか必ずしもはっきりしない。これについては、マグニチュード・エネルギーの経験式の再検討を含め、もう一度吟味する必要がある [KIKUCHI and FUKAO (1988)]。

§ 3. 多重震源解析の歴史

大地震で観測される実体波は上のハスケルモデルから期待される波動よりずっと複雑である。このことは、大地震の震源が時間的空間的に広がった不規則な破壊から成ることを物語る。このような不規則破壊の 1 つのモデルが多重震源である。これは時間的空間的に離散的な広がりを持つ複数個の小破壊の連鎖反応を意味する。

大地震の多重震源性については、地震記録上で構造に起因する反射・屈折相とは異なる相の存在によって、かなり前から指摘されてきた。たとえば、IMAMURA (1937, p. 265) は地震記象上の震源に起因する特異相の数により、1922 年浦賀水道地震を“unit-source”地震、1927 年丹後地震を“twin-source”地震、1923 年関東大地震を“multi-source”地震と名付けた。吉山 (1950) は 1946 年南海道地震について、初めは余震と同程度、後の方ではずっと大きな振幅を持つ数個の特異相を同定し、多重震源の存在を示唆した。その後、このような特異相の方位依存性を基に、個々の小破壊の位置やそれらを連結する見かけの破壊速度なども見積られるようになった [WYSS and BRUNE (1967), OIKE (1969), TRIFUNAC and BRUNE (1970)]。一方、MIYAMURA *et al.* (1965) は単にこのような多重震源の存在を指摘するのみならず、それが構造の不均一性に起因する、大地震の本質的な側面であることを指摘した。そして個々の小破壊の連鎖など、多重震源の“pattern”の研究の重要性を説いた。

やがて特異相の同定だけでなく地震波形全体を使った多重震源の解析法が現れた。この種の先駆的研究は、FUKAO (1970) の深発大地震の解析に見られる。深発地震においては、記録の解析においてやっかいな地表での反射相が震源過程の継続時間に比べてずっと後の方にやってくるので、地震記録から震源の情報を取り出すのが比較的容易である。実際、観測記録から地震計の特性と伝播経路の減衰特性を取り除くことによって震源時間関数が得られる。これをいろいろな方位について比較することにより、個々の小破壊の位置と発震時刻と大きさを決めることができる。このような方法で深発大地震の多重震源過程が求められてきた [たとえば KOYAMA (1976), SASATANI (1980)]。多重震源の空間分布は、P 波初動放射パターン 2 つの節面のうちどちらがすべり面かを選定する際に有効である。とくに深発地震では余震がほとんどないので、多重震源解は重要である。[FUKAO (1973), FUKAO and KIKUCHI (1987)]。

浅い大地震の場合には、地表面での反射相が P 波初動のすぐ後に混在してくるので、震源の情報を抽出するためには、その反射相の理論評価が不可欠である。HELMBERGER らは一連の論文のなかで、浅い地震の震源過

程の解析に遠地地震(震央距離 $30\sim 90^\circ$)の実体波記録が有用であることを示した。その場合、たとえばP波では直達P波に加えてpP相とsP相を、SH波では直達S波に加えてsS相を考慮すれば実用に十分な理論記象を作れることを示した [HELMBERGER (1974), LANGSTON and HELMBERGER (1975), KANAMORI and Stewart (1976)]。こうして浅い地震の震源過程の研究に対しても実体波の使用の道が開かれた。

BURDICK and MELLMAN (1976) は、1968年の Borrego Mt. 地震 ($M_s=6.8$) の遠地実体波を詳しく調べ、20秒間余の観測波形が主破壊と2つの小破壊による理論波形によってうまく説明できることを示した。KANAMORI and STEWART (1978) は、1976年 Guatemala 地震 ($M_s=7.5$) を調べ、観測された実体波が約10個の小破壊の重ね合わせによってうまく合成できることを示した。同様に RIAL (1978) は1967年のベネズエラ地震 ($M_s=6.7$) をエシェロン型の3つの小破壊に帰着させた。また、KANAMORI (1979) は、グアテマラ地震の解析結果から示唆されるくいちがいの不均一分布と余震の記録を用いて、半経験的な強震記録の合成を行った。この研究は、扱った周期帯域が高層建築物の固有周期を含むものであったことなどから、地震工学の分野に少なからぬ刺激を与えた。実際、このころから、地震学における工学部門の比重が急速に高まっていった。これらの研究を契機に、80年代に入ってこのかた、複雑な地震記録についてのインバージョン法が次々に開発された。この間、遠地地震の記録だけでなく、近地地震についても理論記象の合成法が開発され、インバージョンの対象となってきた。

§ 4. 複雑な地震波動のインバージョン法

今日、複雑な地震記録の解析手法については、一通り出尽くした感があり、焦点は個々の地震についての解析結果の蓄積に移りつつある。このような段階において、波形解析の主な手法を概観することは、今後の震源過程の研究にとって意義のあることと思われる。とくに、次のような事情を考慮するとなおさらである。すなわち、近い将来、グローバル高性能地震観測網が整備されようとしており、これまでデータが手に入りにくかった研究者も手軽に世界の地震記録を収集できるようになるであろうし、また、利用できる高速コンピュータもたいてい身近にある。したがって、これらの条件に、インバージョンの数値的テクニックを付加すれば、どこでも誰にでも波形の解析を行える条件が整えられる。

Table 1 に、いくつかの波形インバージョン法を示す。これらは複雑な地震波形から震源の情報を抽出しよ

うとの試みで開発されたものである。いずれの場合にも共通する考え方として、まず、震源をある種の単純な要素の重ね合わせとみなすこと、その上で、観測波形に理論波形が何らかの意味で最も良く合うように各要素のパラメータを決める、ということである。もう少し具体的に言えば、いずれの方法も次のような3つの手順を含んでいる。すなわち、(1) 震源の表現(震源要素の定義)(2) グリーン関数の評価(震源要素に対する理論記象の計算)(3) 最適化(最小二乗法の数値的技法)である。各項目について見るとそれほど多種多様ではない。解析法の多様さは各項目の組み合わせの多様さによると言って良い。以下、(1)、(2)について概略する。

(1) 震源の表し方

前述のハスケルモデルに見られた簡単化のための仮定(一様なくいちがい、一定の破壊速度)を緩める形で、次のような(A)、(B)2通りの表現法がとられる。これらは互いにある程度の互換性をもつが、完全に等価ではない。

(A) くいちがいの場による表現

断層面をいくつかの小領域(ふつう矩形要素)に分割し、それぞれの小領域におけるくいちがい関数によって震源過程を表す。記録の分解能やインバージョンの安定性などを考慮し、くいちがいは一カ所一度だけ起こるものと仮定されることが多い。この場合、各小領域のくいちがい運動を特徴づける量は、最終的くいちがい、ライズタイム、くいちがい開始時刻などである。

この表現の背景には、すべりが1枚(または数枚)の断層面上で起こること、地震波の複雑さを規定している第一義的要因がくいちがいの不均一分布と破壊フロントの不規則な進行であるとの考えがある。

(B) サブイベントの時空分布による表現

時間的空間的に見て一つながりの断層運動を一つの破壊要素とみなし、その破壊要素の離散的な重ね合せによって震源過程を表す。各破壊要素は、メカニズム解(モーメントテンソル)、大きさ(地震モーメント)、発震時刻、位置、継続時間、破壊領域などによって特徴づけられる。破壊要素の数が多き場合には、未知数を減らすために、メカニズム解、継続時間、破壊領域などは一定とみなされることが多い。

この表現は、各小破壊の独立性(不連続性)を前提に、それらの不規則的な連鎖反応が地震波の複雑さを規定している要因であるとの考えに基づくもので、狭義の意味での「多重震源」の考えに沿った表現である。

(2) グリーン関数の設定

グリーン関数の求め方には大別して2つの方法がある。1つは理論的に計算する方法、もう一つは、震源域

Table 1. Examples of waveform inversion

Reference	Source description (source element*)	Green's function ⁺	Inversion (constraint)	Examples: data/earthquake
KIKUCHI & KANAMORI (1982, 1986)	subevent sequence (PD along fault strike)	ray theory	iterative deconvolution	far-field WWSSN-LP /Guatemala (1976) Tangshan (1976)
OLSON & ASPEL (1982)	dislocation distribution (PD at grids)	wavenumber integration	generalized inverse (confined slip vector)	near-field ground motion/Imperial Valley (1979)
RUFF & KANAMORI (1983a)	source time function (impulsive source: $\delta(t) \delta^3(x)$)	ray theory	generalized inverse	far-field WWSSN-LP (Core diffract.)/ Kurile Is. (1963)
NABELEK (1984)	subevent sequence (PD at arbitrary point)	ray theory	Gauss- Newton method (weak constraint)	far-field WWSSN & GDSN body waves/ Lice (1975)
TAKEO (1987, 1988)	dislocation distribution (PD at grids)	wavenumber integration	Gauss- Newton method	JMA strong motion/ Nagano-Ken (1984) Izu-Hanto (1980)
MORI & SHIMAZAKI (1984, 1985)	moment distribution (PD at grids)	super- position of normal modes	linear least square error	near-field short- period Rayleigh/ Tokachi-Oki (1968)
KIKUCHI & FUKAO (1985, 1987)	subevent sequence (PD at grids)	ray theory	iterative decon. (positive moment)	far-field WWSSN-LP /Alaska (1964), Rat Is. (1965)
IIDA & HAKUNO (1984)	relative dislocation distribution (PD at grids)	records of smaller ear- thquakes	Forward Problem + minimum error criteri- on	near-field short- period accelerogram /Tokachi-Oki (1968)
TAKENAKA (1987)	moment distr. (PD smoothed over small fault area)	DWFE	Biggs' quasi- Newton method	JMA strong motion/ Izu-Hanto-Toho-Oki (1980)
YOSHIDA (1986, 1987)	continuous dislocation distr. (FD at small; area)	ray theory	Gauss- Newton method (weak constraint)	GDSN LP & IP/ Izu-Bonin (1983) South Honshu (1984)
FUKUYAMA & IRIKURA (1986)	Relative moment distribution (PD at grids)	records of aftershocks	Gauss- Newton method	JMA strong motion (S & D type)/ Nihonkai-Chubu (1983)
KOYAMA (1987)	time function of moment tensor (moment tensor element)	ray theory	singular value decon- position	far-field WWSSN-LP body wave/ Nihonkai-Chubu (1983)

* PD=point dislocation; FD=finite-length dislocation

⁺ DWFE=discrete wavenumber/finite element

内で起こった小地震（余震）の記録を利用する方法である。前者についてはさらに、観測データの種類（近地震か遠地震か、実体波か表面波かなど）に応じていくつかに分けられる。実体波を例にあげれば、次のような方法がある。

（A）波線理論による方法

まず、震源近傍でのダブルカップル点震源による振幅の方位依存性（放射パターン）を求め、これに地球の層構造による震波線の曲がりと地表での反射効果に関係した因子をかける。さらに、 Q^{-1} による波形の変化及び地震計のインパルス応答をコンボリューションして理論波形を合成する。震源が浅い場合には、直達P波のすぐ後に、pP波やsP波といった反射波が続くので、理論記象にこれらの相を含める。また海水の影響や表層地盤を考慮する場合には、対応する伝達関数をコンボリューションする [SENO and KROEGER (1983)]。

この方法がうまく適用できるのは、震央距離 Δ が $30^\circ < \Delta < 90^\circ$ の遠地実体波に対してである。この範囲では、波線経路の影響による波形の変化が小さく、 Q^{-1} 効果を考慮するだけで十分な近似が得られる。

（B）波数積分法

近地地震の強震記録などには、比較的短周期の成分が大きく、それだけ表層や地殻の成層構造の影響を大きく受けている。したがって、これを評価するにあたっては、（A）のような波線の扱いではもはや不十分であり、弾性波動理論的扱いを必要とする。そこで、水平成層構造を仮定し、変位を水平座標の固有関数を用いて展開する。その上で鉛直座標に依存する係数を求める。代表的には、行列表示の方法 [KENNET and KERRY (1979), 武尾 (1985)] や、深さ方向への微分形式を用いる方法 [OLSON *et al.* (1984)] などがある。

（C）小地震の観測記録からの変換法

実際の媒質の構造は、（A）や（B）で用いたような成層構造ではなく、3次元的に不均質であり、観測される地震波動にはそれら不均質性による散乱波や回折波が混在する。したがって、理論的にグリーン関数を計算することには、おのずと限界がある。そこで理論的手法に代わって、小地震の観測記録を代用しようとする試みがある。小地震として、本震の震源域内で起こった余震を用いれば、その記録はすでに媒質の不均質に起因する散乱波、回折波を含め、あらゆる相を含んでいる。この方法の最大の利点はここにある。

ふつう、余震記録をそのままグリーン関数とするのではなく、本震との大きさの違いによる震源パラメータの違いを考慮し、特性時間（ライズタイム）などを補正してから用いる。この種の代表的な補正法として KANA-

MORI and ANDERSON (1975) らの地震の相似則を基礎とした方法がある [FUKUYAMA and IRIKURA (1986)]。この場合、できるだけ単純な震源から成る小地震を選択することが重要となろう。

§ 5. 不規則震源過程

震源過程の不規則性は、より根元的には、断層面上の不均一強度分布を反映したものと考えられる。断層面の強度の不均一性を概念化したモデルとして、安芸らのバリアモデル [DAS and AKI (1977), AKI (1979)] と金森らのアスペリティモデル [KANAMORI (1981), LAY *et al.* (1982)] とがある。バリアもアスペリティも強度の大きい部分を表現したものであるが、両モデルは本震の震源過程について対照的な内容を持つ。バリアモデルでは、強い部分の割れ残しが震源過程の不規則性の主要因であり、また、その割れ残し部分への応力集中が余震発生の主要因と見る。これに対しアスペリティモデルでは、強い部分の破壊こそ本震の主要過程であり、それを取り囲む弱い部分は前震の発生パターンを形成すると見る。またそれぞれのモデルから期待される震源パラメータ間の相関（たとえば地震モーメントと応力降下）にも違いのあることが指摘されている [MADARIAGA (1979), RUDNICKI and KANAMORI (1981)]。しかし、それらを実際に波形解析の上で区別することは難しいであろうし [DAS and KOSTROV (1988)]、また現実には断層面の強い部分はバリアにもアスペリティにもなり得てであろうから、いずれか一方が真で他が偽というというものではないであろう。いずれにせよ、断層面上の強度の不均一分布は、短周期地震動の励起 [MIKUMO and MIYATAKE (1987)] をはじめ、マグニチュード・頻度分布、前震・本震・余震の発生パターン [MOGI (1967)]、さらには破壊現象一般 [平田 (1987)] としての地震の諸特性を規定している根元といえる。

このような重要性から考えて、多重震源解析の主たる目的の一つは、断層面上の不均一強度分布の情報を抽出することにあると言ってよい。このことを最も鮮明に打ち出しているのは RUFF や LAY らの研究である。彼らは波形のインバージョンで得られた震源時間関数の形状からアスペリティの大きさと分布を推測した [たとえば LAY and KANAMORI (1980), RUFF and KANAMORI (1983a), RUFF (1983)]。こうして、北太平洋の沈み込み帯に沿ったいろいろな大地震を比較する中で、アスペリティと沈み込み帯のテクトニクスとの関連性を調べ、いくつかにパターン化した [LAY *et al.* (1982), RUFF and KANAMORI (1983b)]。すなわち、「さしわたし 500 km べた一面アスペリティ」のチリ型から、アリュシャン型、

千島型を経て、「べた一面非アスペリティ」のマリアナ型である。一方、KANAMORI and McNALLY (1982) はコロンビア西海岸の同じ地域で起こったいくつかの大地震を調べ、複数のアスペリティの破壊が個々のアスペリティの破壊よりもずっと大きな地震モーメントの解放をもたらすことを指摘した。RUNDLE and KANAMORI (1987) はこのような複数アスペリティの相乗効果から、逆に、個々のアスペリティの特性を求めた。また SCHWARTZ and RUFF (1987) は千島列島沿いのいろいろな規模の地震について、やや詳しくアスペリティの分布を調べ、さしわたし 100 km 未満の強いアスペリティとそれを取り囲む弱いアスペリティまたは小さいアスペリティというパターンを推測した。

KIKUCHI and FUKAO (1987) は、沈み込み帯の大地震（モーメントが $7 \times 10^{27} \sim 8 \times 10^{29}$ dyn·cm）9 個について多重震源の時空分布を求めた。その結果、これらの地震にほぼ共通に、時定数 10 秒程度の小破壊が含まれること、平均破壊速度は 1~3 km/s で S 波速度より有意に遅いこと、局所的応力は平均応力よりほぼ 1 桁大きいことなどを見出した。また、 M_w 9 クラスの巨大地震では、このような小破壊だけでは全体の地震モーメントを説明し切れず、したがってより長い時定数の破壊要素が含まれるべきことを示した。

MORI and SHIMAZAKI (1984, 1985) は 1968 年十勝沖地震 ($M_s=7.9$) について、強震加速度記録や WWSSN の短周期実体波などを用いて 2 個の短周期発生源を同定し、それが周期 10~25 秒の近地表面波のインバージョンによるくいちがいの空間分布と調和的であることを確かめた。また、短周期源の局所的応力を 4~5 kbar と推定した。

波形のインバージョンによって得られたすべり運動の不均一性は、活断層や火山など地質学的な構造と、あるいはまた余震分布と比較され、その関連性が調べられている。たとえば、TAKEO (1987, 1988) は日本の内陸型地震について強震記録のインバージョンを行い、すべりの大きい部分で顕著な余震が少ないことや単成火山群が地殻の弱部となっていることなどを明らかにした。本震のすべりと前震・余震活動との相補性については、1980 年伊豆半島東方沖地震 ($M=6.7$) についての TAKENAKA (1987) の研究にも見られる。SATO (1985) は、1983 年日本海中部地震 ($M_s=7.7$) の強震加速度記録を解析し、初期破壊点付近及び北北東 40 km 余の地点に強い短周期発生源を同定するとともに、それらの間に低い余震活動帯があることに注目し、延性的なバリアの存在を示唆した。また、1979 年 Imperial Valley ($M_L=6.6$) 地震では、断層の走向に垂直に張られた強震計アレイのデータが最

大限活用されて、すべり運動についての詳細な微細構造が得られている [HARTZELL and HELMBERGER (1982), ARCHULETA (1984)]。

震源過程の不規則性の要因として、とくに内陸の大地震などでは、複数断層にわたるすべり破壊も無視できない。NABELEK (1985) は、1980 年アルジェリア地震 ($M_s=7.3$) について、地表で観察された折れ曲がりの地震断層を基に、2 つの断層面から成る震源モデルを作り、遠地実体波と比較してそれぞれの断層パラメータを得た。そして断層の折れ曲がりの部分がバリアとなったことを示した。同様の断層の折れ曲がりによるバリアないしアスペリティ効果については、KING and NABELEK (1985) によってパターン化されている。また 1976 年 Tangshan 地震 ($M_s=7.7$) では、主断層である横ずれの断層運動に誘発されて、その端付近に縦ずれ断層が形成されたことが波形のインバージョンから示唆された [BUTLER *et al.* (1979), KIKUCHI and KANAMORI (1986), NABELEK *et al.* (1987)]。

地震の初期の段階は、小破壊から大きな破壊への成長の物理的機構を知る上でとくに興味深い。大地震において一種のウォーミングアップ過程が存在することは、FUKAO and FURUMOTO (1975) や FURUMOTO (1979) によって示されている。MORI (1984) は 1985 年 Rat Is. 地震 ($M_w=8.7$) について、比較的初期の段階に小破壊のクラスターが形成されていることを示した。また、UMEDA (1981) や梅田 (1985) は、広帯域の近地地震記録をもとに、初期破壊の過程で小さい領域から短周期地震波が集散的に放出されることを発見し、この領域を震源核と呼んだ。時間間隔や規模において違いはあるが、類以の現象として、西上 (1982) によって示された地震群のクラスター構造の形成が注目される。

短周期地震動の発生源の研究は地震工学の分野でも精力的になされている [たとえば FUJINO *et al.* (1984), IIDA and HAKUNO (1984), 辰巳・佐藤 (1987)]。この場合、その「発生源」が必ずしもくいちがいやダブルカップル源を指すとは限らない。

§ 6. 多重震源の力学的裏づけと展望

波形のインバージョンにおいて我々が直接的に得る情報はくいちがいの分布である。この情報を断層面上の強度分布に結びつけるには、すべりに関する何らかの力学的モデルが必要となる。よく用いられるのは、古典的摩擦法則を含んだ割れ目のモデルである。ここに言う「古典的摩擦法則」とは、最大静止摩擦係数と動摩擦係数の 2 つによって規定される摩擦法則のことである。動摩擦がすべり速度に依存しないことが最大の特徴である。こ

の場合、「強度」は破壊エネルギーによって表現され、その空間分布によって破壊過程のパターンが決められる。このモデルは極めて単純明解であるが、最近の摩擦すべりの実験結果と相容れない内容を含む。

最近の摩擦すべりの実験によると、摩擦力は準静的な遅いすべりに対して速度依存性を示す [たとえば DIETERICH (1978)]. この依存性の符号が、バネで引かれた物体の摩擦すべり運動の安定・不安定を左右する [RUINA (1983), RICE and TSE (1986)]. 摩擦力のすべり速度依存性は、実は、速いすべり速度でも見られる。たとえば OHNAKA *et al.* (1987) は伝播するすべり破壊の先端部で応力やすべり量の時間変化を測定し、摩擦応力やすべり量やすべり速度に依存することを明らかにした。

このように摩擦力がすべり速度に依存する場合には、「強さ」というものをレオロジー風にとらえなければならない。たとえば、弾性論的な衝撃に対する強さと準静的な力に対する強さは区別されなければならない。この観点から巨大地震のアスぺリティを規定すると、「準静的な力に対して強いが衝撃に対して弱い」部分といえる。これに対し、それを取り囲む部分は「衝撃に対して強いが準静的な力に対して弱い」部分といえる。後者は、破壊伝播を律速する領域となる。

このような律速領域の存在は、多重震源だけでなく、ほかの似たような連発型の現象においても重要である。そのような現象として、たとえば、断層帯や沈み込み帯に沿った大地震の震源の移動 [MOGI (1968a, 1969), KELLEHER (1972)], 巨大地震において大きな余震が主破壊の伝播をたどるように移動する現象 [MOGI (1968b)],あるいは内陸地震の余震域の移動 [SACKS *et al.* (1981)],さらには、Solomon 諸島でよく見られる、数分から数日間隔の2~4連発型地震 [LAY and KANAMORI (1980), WESNOUSKY *et al.* (1986)] などがある。これらはアスぺリティの分布と同様に、それに隣り合う領域の律速過程の存在を物語っている。律速過程の1つのモデルとして、応力腐食割れを念頭においた割れ目の準静的伝播モデルがある [DAS and SCHOLZ (1981)] が、最近の実験の成果を取入れた摩擦すべりのレオロジーによるモデルの試みもある [TSE and RICE (1986)].

このように、バリアやアスぺリティの物理的性質を解明していくためには、室内実験との共同作業が重要である。波形解析の立場からは、バリアやアスぺリティのすべり運動特性と同時に、それを取り巻く領域の長周期的な運動特性を調べることも、また、初期破壊から主破壊に至る過程を調べることも重要である。これに関して、近々整備されるであろう広帯域デジタル地震観測網の記録に期するところが大きい。一方、 M_w 9クラスの巨大地

震はそれ程頻繁には起こらないから、1960年代の巨大地震は、依然として、貴重な実例である。この場合、時定数100秒、特徴的長さ100km程度の不均一性が問題となる。地球内部構造の詳細が明らかになれば、長周期表面波・自由振動の記録がこれら巨大地震の多重震源解析に有効となる。

多重震源を特徴づけるものは、すべりの不均一性と破壊伝播の不連続性である。この不均一・不連続性に加えて、地震波の複雑さを規定するもう一つの重要な要因は「階層性」である。この概念は FUKAO and FURUMOTO (1985) によって提唱されたものである。今日流に言えば、「フラクタル構造」であるが、今のところ自己相似性にこだわる必要のあるような事実はない。ただ、多重震源過程の核心は「微小破壊の連鎖反応から大破壊への転化のプロセス」であり、これはまさに破壊の階層性と言って良いであろう。このモデルはもともとは地震学的ないくつかの状況証拠を基に作られたものであるが、地震学以外の1つの裏づけとして次の地質学的事実は興味深い。松田 (1988) によると、個々の大地震に相当する「断層帯」(長さ10~100 km) は、その下部構造として「断層線」(長さ数 km), さらに「地割れ」(長さ数 m) といった階層構造を持つ。こうして、今後、地震の源に関する研究においては、不均一・不連続・階層の3つの要素をキーワードとして、地震学的諸現象が統一的にとらえられていく可能性がある。その際、§1で述べたような2つのアプローチを両輪として震源過程の法則性を探っていくことが大切であろう。

参考文献

- AKI, K., 1967, Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1217-1231.
- AKI, K., 1972, Earthquake mechanism, *Tectonophysics*, **13**, 423-446.
- AKI, K., 1979, Characterization of barriers on an earthquake fault, *J. Geophys. Res.*, **84**, 6140-6148.
- ARCHULETA, R. J., 1984, A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake, *J. Geophys. Res.*, **89**, 4559-4585.
- BURDICK, L. J. and G. R. MELLMAN, 1976, Inversion of the body waves from the Borrego Mountain earthquake to the source mechanism, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 1485-1499.
- BRUNE, J. N., 1970, Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4997-5009.
- DAS, S. and K. AKI, 1977, Fault planes with barriers: A versatile earthquake model, *J. Geophys. Res.*, **82**, 5658-5670.
- DAS, S. and B. V. KOSTROV, 1988, An investigation of

- the complexity of the earthquake source time function using dynamic faulting models, *J. Geophys. Res.*, **93**, 8035–8050.
- DAS, S. and C. H. SCHOLZ, 1981, Theory of time-dependent rupture in the earth, *J. Geophys. Res.*, **86**, 6039–6051.
- DIETERICH, J. H., 1978, Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip, *Pageoph*, **116**, 790–806.
- ESHELBY, J. D., 1957, The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proc. Roy. Soc. London A*, **241**, 376–396.
- FUJINO, Y., T. YOKOTA, Y. HAMAZAKI and R. INOUE, 1984, Multiple event analysis of 1979 Imperial Valley earthquake using distinct phases in near-field accelerograms, *Proc. Japan Soc. Civil Eng.*, No. 344/1-1, 165–174.
- FUKAO, Y., 1970, Focal process of a deep focus earthquake as deduced from long-period P and S waves, *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, **48**, 707–727.
- FUKAO, Y., 1973, Seismological evidence for selectivity in slip planes under down-dip extension or compression, *Geofisica International*, **13**, 223–242.
- FUKAO, Y. and FURUMOTO, M., 1975, Foreshocks and multiple shocks of large earthquakes, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **10**, 355–368.
- FUKAO, Y. and M. FURUMOTO, 1985, Hierarchy in earthquake size distribution, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **37**, 149–168.
- FUKAO, Y. and M. KIKUCHI, 1987, Source retrieval for Mantle earthquakes by iterative deconvolution of long-period P-waves, *Tectonophysics*, **144**, 249–269.
- FUKUYAMA, E. and K. IRIKURA, 1986, Rupture process of the 1983 Japan Sea (Akita-Oki) earthquake using a waveform inversion method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**, 1623–1640.
- FURUMOTO, M., 1979, Initial phase analysis of R waves from great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **84**, 6867–6874.
- GUSEV, A. A., 1983, Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimation of short-period strong motion, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **74**, 787–808.
- HARTZELL, S. and D. V. HELMBERGER, 1982, Strong-motion modeling of the Imperial Valley earthquake of 1979, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 571–596.
- HASKELL, N., 1969, Elastic displacements in the near-field of a propagating fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **59**, 865–908.
- HELMBERGER, D. V., 1974, Generalized ray theory for shear dislocations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **64**, 45–64.
- 平田隆幸, 1987, 新しい地震観とフラクタル, *地震* **2**, **40**, 459–467.
- HOUSTON, H. and KANAMORI, H., 1986, Source spectra of great earthquakes: Teleseismic constraints on rupture process and strong motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**, 19–42.
- IDA, M. and M. HAKUNO, 1984, Study on complexity of large earthquakes, *Proc. Japan Soc. Civil Eng.*, No. 350/1-2, 47–57.
- IMAMURA, A., 1937, *Theoretical and Applied Seismology*, Maruzen, Tokyo, 358 pp.
- KANAMORI, H., 1977, The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **82**, 2981–2987.
- KANAMORI, H., 1979, A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **69**, 1645–1670.
- KANAMORI, H., 1981, The nature of seismicity pattern before large earthquakes, in "Earthquake Prediction" ed. by D. W. Simpson and P. G. Richard, *An International Review Maurice Ewing Series 4*, AGU, Washington D.C., 1–19.
- KANAMORI, H. and Anderson, D. L., 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **65**, 1073–1095.
- KANAMORI, H. and K. C. McNALLY, 1982, Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombia coast, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 1241–1253.
- KANAMORI, H. and G. S. STEWART, 1976, Mode of the strain release along the Gibbs fracture zone, Mid-Atlantic ridge, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **11**, 312–332.
- KANAMORI, H. and G. S. STEWART, 1978, Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 21, 1976, *J. Geophys. Res.*, **83**, 3427–3434.
- KELLEHER, J. A., 1972, Rupture zones of large south American earthquakes and some predictions, *J. Geophys. Res.*, **77**, 2087–2103.
- KENNET, B. L. N. and N. J. KERRY, 1976, Seismic waves in a stratified half space, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **57**, 557–583.
- KIKUCHI, M. and Y. FUKAO, 1985, Iterative deconvolution of complex body waves from great earthquakes—the Tokachi-Oki earthquake of 1968, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **37**, 235–248.
- KIKUCHI, M. and Y. FUKAO, 1987, Inversion of long-period P waves from great earthquakes along subduction zones, *Tectonophysics*, **144**, 231–247.
- KIKUCHI, M. and Y. FUKAO, 1988, Seismic wave energy inferred from long-period body wave inversion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**, 1707–1724.
- KIKUCHI, M. and H. KANAMORI, 1982, Inversion of complex body waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 491–506.
- KIKUCHI, M. and H. KANAMORI, 1986, Inversion of complex body waves-II, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **43**, 205–222.
- KING, G. and J. NABELEK, 1985, Role of fault bends in the initiation and termination of earthquake rupture, *Science*, **228**, 984–987.
- KOYAMA, J., 1976, Source process of Vladivostok deep focus earthquake of September 10, 1973, *Sci.*

- Report Tohoku Univ., Ser. 5 (Geophysics), **23**, 83-101.
- 小山順二, 1983, 伝播性破壊確率モデルと地震の震源スペクトル, 地震 **2**, **36**, 225-235.
- 小山順二, 1987, 1983 年日本海中部地震の時間依存モーメントテンソル, 地震 **2**, **40**, 405-416.
- 小山順二・鄭 斯華・鈴木次郎, 1984, 巨大地震が励起したランダムな位相をもつ短周期実体波, 地震 **2**, **37**, 655-669.
- LANGSTON, C. A. and D. V. HELMBERGER, 1975, A procedure for modelling shallow dislocation sources, Geophys. J. R. astr. Soc., **42**, 117-130.
- LAY, T. and H. KANAMORI, 1980, Earthquake doublets in the Solomon Islands, Phys. Earth Planet. Interiors, **21**, 283-304.
- LAY, T. H., H. KANAMORI and L. RUFF, 1982, The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes, Earthquake Prediction Res., **1**, 3-71.
- MADARIAGA, P., 1979, On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity, J. Geophys. Res., **84**, 2243-2250.
- 松田時彦, 1988, 活断層の数的性質, “数理地震学(Ⅲ)”, 斎藤正徳編, 174-184.
- MIKUMO, T. and T. MIYATAKE, 1987, Numerical modeling of realistic fault rupture processes. “Seismic Strong Motion Synthetics”, ed. by B. A. Bolt, Academic Press, 91-151.
- MIYAMURA, S., S. OMOTE, R. TEISSEYRE and E. VESANEN, 1965, Multiple shocks and earthquake series pattern, Bull. Inter. Inst. Seism. Earthq. Eng., **2**, 71-92.
- 茂木清夫, 1967, 前震・群発地震について, 地震 **2**, **20**, 143-146.
- MOGI, K., 1968a, Migration of seismic activity, Bull. Earthq. Res. Inst., **46**, 53-74.
- MOGI, K., 1968b, Development of aftershock areas of great earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst., **46**, 175-203.
- MOGI, K., 1969, Relationship between the occurrence of great earthquakes and tectonic structures, Bull. Earthq. Res. Inst., **47**, 429-451.
- MORI, J., 1984, Short- and Long-period subevents to the February 4, 1965 Rat Islands earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., **74**, 1331-1347.
- MORI, J. and K. SHIMAZAKI, 1984, High stress drops of short-period subevents from the 1968 Tokachi-Oki earthquake as observed on strong-motion records, Bull. Seism. Soc. Am., **74**, 1529-1544.
- MORI, J. and K. SHIMAZAKI, 1985, Inversion of intermediate-period Rayleigh waves for source characteristics of the 1968 Tokachi-Oki earthquake, J. Geophys. Res., **90**, 11374-11382.
- NABELEK, J., 1984, Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves, Ph. D. thesis, Mass. Inst. Technology, Cambridge, MA., pp. 361.
- NABELEK, J., 1985, Geometry and mechanism of faulting of the 1980 El Asnam, Algeria, earthquake from inversion of teleseismic body waves and comparison with field observations, J. Geophys. Res., **90**, 12713-12728.
- NABELEK, J., WAING-PING Chen, HONG Ye, 1987, The Tangshan earthquake sequence and its implications for the evolution of the North China basin, J. Geophys. Res., **92**, 12615-12628.
- 西上欽也・佃 為成, 1982, 小地震およびその前震余震群の発生過程とクラスター構造, 地震 **2**, **35**, 523-537.
- OHNAKA, M., Y. KUWAHARA and K. YAMAMOTO, 1987, Constitutive relations between dynamic physical parameters near a tip of the propagating slip zone during stick-slip shear failure, Tectonophysics, **144**, 109-125.
- 大内 徹, 1988, 震源過程に関する数理的考察—フラクタル的震源の確率モデルとその地震波スペクトル, 地震 **2**, **41**, 71-78.
- OIKE, K., 1969, The deep earthquake of June 22, 1966 in Banda Sea: A multiple shock, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., **19**, 55-65.
- OLSON, A. H. and R. J. ASPEL, 1982, Finite faults and inverse theory with applications to the 1979 Imperial Valley earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., **72**, 1969-2001.
- OLSON, A. H., J. A. ORCUTT and G. A. FRAZIER, 1984, The discrete wavenumber/finite element method for synthetic seismograms, Geophys. J. R. astr. Soc., **77**, 421-460.
- PAPAGEORGIOU, A. S., 1988, On the two characteristic frequencies of acceleration spectra: Patch corner frequency and $f_{\max}$, Bull. Seism. Soc. Am., **78**, 509-529.
- RIAL, J. A., 1978, The Caracas, Venezuela, earthquake of July 1967: a multiple-source event, J. Geophys. Res., **83**, 5405-5414.
- RICE, J. R. and S. T. TSE, 1986, Dynamic motion of a single degree of freedom system following a rate and state dependent friction law, J. Geophys. Res., **91**, 521-530.
- RUDNICKI, J. W. and L. B. FREUND, 1981, On energy radiation from seismic sources, Bull. Seism. Soc. Am., **71**, 583-595.
- RUDNICKI, J. and KANAMORI, H., 1981, Effects of fault interaction on moment, stress drop and strain energy release, J. Geophys. Res., **86**, 1785-1793.
- RUFF, L., 1983, Fault asperities inferred from seismic body waves, in “Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation”, ed. by H. Kanamori and E. Boshi, North-Holland, 251-276.
- RUFF, L. and KANAMORI, H., 1983a, The rupture process and asperity distribution of three great earthquakes from long-period diffracted P waves, Phys. Earth Planet. Interiors, **31**, 202-230.

- RUFF, L. and KANAMORI, H., 1983b, Seismic coupling and uncoupling at subduction zones, *Tectonophysics*, **99**, 99-117.
- RUINA, A., 1983, Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, **88**, 10359-10370.
- RUNDLE, J. B. and H. KANAMORI, 1987, Application of an inhomogeneous stress (patch) model to complex subduction zone earthquakes: a discrete interaction matrix approach, *J. Geophys. Res.*, **92**, 2606-2616.
- SACKS, I. S., A. T. LINDE, J. A. SNOKE and S. SUEHIRO, 1981, A slow earthquake sequence following the Izu-Oshima earthquake of 1978, in "Earthquake Prediction" ed. by D. W. SIMPSON and R. G. RICHARD, An international Review Maurice Ewing Series 4, AGU, Washington D. C., 617-628.
- SASATANI, T., 1980, Source parameters and rupture mechanism of deep-focus earthquakes, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, **6**, 301-384.
- SATO, T., 1985, Rupture characteristics of the 1983 Nihonkai-Chubu (Japan Sea) earthquake as inferred from strong motion accelerograms, *J. Phys. Earth*, **33**, 525-557.
- SCHWARTZ, S. Y. and L. J. RUFF, 1987, Asperity distribution and earthquake occurrence in the southern Kurile Islands arc, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **49**, 54-77.
- SENO, T. and G. KROEGER, 1983, A reexamination of earthquakes previously thought to have occurred within the slab between the trench axis and double seismic zone, northern Honshu arc, *J. Phys. Earth*, **31**, 195-216.
- TAKENAKA, H., 1987, Strong-motion modeling of the Izu-Hanto-Toho-Oki earthquake by inversion method, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, **8**, 155-172.
- 武尾 実, 1985, 非弾性減衰を考察した震源近傍での地震波合成, 気象研究所研究報告, **36**, 245-257.
- TAKEO, M., 1987, An Inversion method to analyze the rupture processes of earthquakes using near-field seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **77**, 490-513.
- TAKEO, M., 1988, Rupture process of the 1980 Izu-Hanto-Toho-Oki earthquake deduced from strong motion seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**, 1074-1091.
- 辰巳安良・佐藤忠信, 1987, 地震波の因果性を用いた地震の多重震源解析, 土木学会論文集, No. 380/I-7, 475-484.
- TRIFUNAC, M. D. and J. N. BRUNE, 1970, Complexity of energy release during the Imperial Valley, California, earthquake of 1940, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **60**, 137-160.
- TSE, S. T. and J. R. RICE, 1986, Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties, *J. Geophys. Res.*, **91**, 9452-9472.
- UMEDA, Y., 1981, An earthquake source model with a ripple generating core, *J. Phys. Earth*, **29**, 341-370.
- 梅田康弘, 1985, 断層運動の加速と震源核の形成, 地震 **2**, **38**, 203-215.
- WESNOUSKY, S. G., L. ASTIZ and H. KANAMORI, 1986, Earthquake multiplets in the southeastern Solomon Islands, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **44**, 304-318.
- WYSS, M. and J. BRUNE, 1967, The Alaska earthquake of 28 March 1964: A complex multiple rupture, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **57**, 1017-1023.
- YOSHIDA, S., 1986, A method of waveform inversion for earthquake rupture process, *J. Phys. Earth*, **34**, 235-255.
- YOSHIDA, S., 1988, Waveform inversion for rupture processes of two deep earthquakes in the Izu-Bonin region, *Phys. earth Planet. Inter.*, **52**, 85-101.
- 吉山良一, 1950, 南海道地震とその一余震について, 地震 **2**, **3**, 22-26.