

## 資 料

### 地震予知のための岩石破壊力学の課題

(第2回破壊力学と地震源機構に関するペンローズ会議・議長質問集)

Chairman's questions of the second Geological Society of America  
Penrose Conference on Fracture Mechanics and Earthquake-Source Mechanism,  
at Snowmass Resort, Colorado, U.S.A., Aug. 26-31, 1974

訳・解説：小 出 仁\*

#### I. 解 説

地下の岩石の破壊によって地震が発生するのであるから、破壊現象の理解が地震予知に役立つだろうと予想できる。しかし、実際に岩石破壊の研究が地震予知に役立つことが認められたのはダイラタンシー・流体ディフュージョン・モデル (NUR, 1972; SCHOLZ ら, 1973) の発表以来である。従来の地震学は地震波の研究にとどまり、地震波の発生源である岩石の破壊現象のような本質的問題はあまり取り上げられなかった。特に日本の地震学は現象論に徹することによって大きな成果を上げたが、現象論のみでは地震予知法にどうしても不確実さが残る。最近ようやく本質的問題も取り上げられるようになったわけだが、地震発生メカニズムはまだ明らかになっていない。ショルツらは地震予知は確率論の時代から決定論の時代へ入ったと宣言したが、本当に決定論の時代に入ったといえるようになるためには、地下の岩石破壊のメカニズムをもっと完全に理解する必要があるだろう。

ダイラタンシー・流体ディフュージョン・モデル発表直前の1971年に開催された第1回破壊力学と地震源機構に関するペンローズ会議は同モデル形成に大きな影響があったと考えられるが、第2回の会議も各種のダイラタンシー・モデルが出つつある1974年8月に開催され、やはり大きな意義があった。第2回破壊力学と地震源機構に関するペンローズ会議には筆者も出席する機会が与えられ、会議の様子はすでに紹介した (小出, 1975) が、会議で出席者に配布されたセッションの議長の質問集は新しい地震予知の研究の指針になるものである。この質問集が出された後すでに相当経っているが、本質的問題はほとんど変わっていない。訳出が遅れたのはひとえに筆者の怠慢のためであることをお詫びしたい。なお筆者に会議出席の機会を与え、また訳出を快諾された会議のコンビーナー ROBERT. E. RIECKER (Air Force Cambridge Research Labs) および各セッション議長に感謝する。なお、地質調査所垣見俊弘氏、伊藤公介氏には訳出にあたり御教示をいただいた。本質問集は専門家向けなので、簡潔すぎて分かりにくい部分があるので、始めに簡単な解説を付け加える (ダイラタンシー・ディフュージョン・モデルに関しては、星野(1974)等多くの解説がある)。

ダイラタンシー・流体ディフュージョン・モデルは、日本では俗にショルツ理論と呼ばれているが、もちろんショルツのみの功績ではないので、ショルツ理論という呼び方は正しくない。原理的にはすでに1965年に F. C. FRANK によって地震発生モデルとして提出され、その後 A. NUR (1972) や SCHOLZ ら (1973) がこのモデルを地震予知に応用できることを示した。この間に岩石破壊の実験的研究が進み、また地震の前兆ではないかと考えられる異常現象がソ連で見出されたため、モデルが現実的になったといえる。

岩石破壊実験によれば、大きな地震をおこすような破壊が起きる前に、多数のマイクロクラックが発生し、そのため岩石中の空隙が増えて岩石全体としての体積が膨張する (“ダイラタンシー”)。地下の空隙には大抵は地下水が含まれているが、空隙の容積が増加すると水圧は低下する。空隙内の水圧が高いと岩石の強度は弱くなり、逆に水圧が低くなると強度が大きくなる。ダイラタンシーのために水圧が

\* 環境地質部

低下している間は破壊が起きない(ダイラタンシー硬化)が、周囲のダイラタンシーを起こしていない岩盤内の水が流入してくる(流体ディフュージョン)と水圧が再び高くなり、強度が急に低下して大きな破壊—大きな地震を起こす。

NUR (1972) はクラック中に水が飽和している時に、わずかの水圧低下があると P 波速度 ( $V_p$ ) が大きく低下するが、S 波速度 ( $V_s$ ) への影響は小さいことに注目し、ダイラタンシー・ディフュージョン・モデル(以後「流体」は略す)によって地震前の  $V_p/V_s$  比の一時的低下を説明した。SCHOLZ (1973) はさらに電気抵抗変化、異常地盤隆起、ラドン含有量増加等の前兆現象もダイラタンシー・ディフュージョン・モデルによって説明できると考えた。

大きな破壊の前にダイラタンシーが起こることは岩石破壊実験(松島, 1960; BRACE ら, 1966)により確かめられている。しかし、岩石内の水の挙動についてはまだ分からないことが多い。そのためディフュージョンが主原因になって前兆現象が起きているという点は疑問になってきた。

大破壊の前にマイクロクラックが岩石内に多数発生することはすでに述べたが、マイクロクラックは初めはいろいろな場所でランダムに発生するが、大破壊前に帯状のゾーンに集中して発生するようになり、その帯状のクラック帯に沿って大破壊—大きな地震が起きるといふモデルがある(小出, 1969; KOIDE ら, 1970)。このマイクロクラックの干渉と帯状集中が大破壊を誘起するというモデルで、水の流動を考えなくても、地震前兆現象を説明できるというのが、いわゆるドライ・ダイラタンシー・モデルである(茂木, 1974; MJACHIKIN ら, 1974, 1975; STUART, 1974; BRADY, 1974)。ドライとはいっても、必ずしも岩石の破壊に水が関与していることを否定しているわけではない。前兆現象が、必ずしも、水の移動のために起こっているのではないと主張しているために、ドライ・モデルと呼ばれているだけであることに注意していただきたい。ドライ・モデルに対して、ダイラタンシー・ディフュージョン・モデルをウェット・モデルと呼ぶことがある。また、ウェット・モデルとドライ・モデルを合わせて、単にダイラタンシー・モデルと総称する。

以上のように地震発生の原因と機構についての議論は、かなり煮詰められてはきたが、未だ十分に解明されていない。岩石破壊力学による地震予知研究の課題は、次の 4 点に要約できると思う。

- (1) 地震を起こす岩石破壊機構の解明、特にマイクロクラックの発生・干渉・集中のプロセスを明らかにする。
- (2) 地下の水の存在状態・移動の機構・水圧およびその地震破壊への影響を調べる。
- (3) 地震破壊と地かく変動との関係、特に活断層や地かく応力と地震の関係の関係を明らかにする。
- (4) 地震破壊のプロセスから予想される観測可能な地震前兆現象を示し、その前兆現象がいつ、どの程度の地震に結びつくかの判定基準を求める。

## II. 議長質問集

### 1. セッション：地震前兆現象の観察—特にダイラタンシーに関連した前駆現象—

#### C. B. RALEIGH (NCER, USGS 米国地質調査所)

- 1)  $V_p/V_s$  比の変化以外にダイラタンシー・ディフュージョン・モデルを明確に検証できる観察事項があるか?  $V_p/V_s$  比異常中に P 波速度の異方性が観察されているか?
- 2) ダイラタンシー以外のあるいはダイラタンシーに加え他の物理的プロセスが前兆現象を起こしていることを示す観察があるか?
- 3) 実験室における地震破壊の前に観察される前兆的クリープは、地震破壊の過程に何らかの意味を持つか? 地震前の前兆的クリープの証拠は?
- 4) ダイラタンシー・モデルを適切に検証するために実行すべき観察は何か? 他のモデルはあるか? 妥当な物理的モデルから計算される変位・歪・傾動は?

### 2. セッション：ダイラタンシー・モデル

#### W. F. BRACE (マサチューセッツ工科大学)

マイクロクラック・ダイラタンシー (MD と略す). 実験室内の観察

- 1) 繰り返し応力, 応力経路, 応力状態, 荷重速度, 鉱物の MD への影響を示す新しい結果があるか?
- 2) 500-600°C で間隙流体を含む時に MD に変化があるか? 500-600°C で応力腐食割れ (註: 応力下で腐食が促進されるために割れる作用. 高温の間隙流体が介在すれば, 応力腐食割れがおきる可能性は十分ある) はあるか?
- 3) マイクログラックの顕微鏡的形態や分布は?
- 4) 地震のパラメーターあるいは断層力学に関連した物理的性質への MD の新しい効果, あるいは効果の証明はあるか?

#### 理論 (MD)

- 5) 力学的, 電気的, あるいは輸送現象に関する性質を含む MD に関する新しい理論的研究は?
- 6) MD により起こされた岩石の異方性の正確な表現は?

#### 巨視的ダイラタンシー (LSD と略す), 断層-ジョイント・ダイラタンシー.

- 7) 直接剪断試験と現場試験による新しい観察は?
- 8) 封圧はどう影響するか?
- 9) ブロック・アレイを使って, 断層-ジョイント・ダイラタンシーはどうモデル化されるか (Goodman, Fairhurst の仕事に注意).
- 10) 断層-ジョイント・ダイラタンシーは地震波速度や輸送現象にどう影響するか? MD 理論は適用できるか?
- 11) 現場での LSD の見積りは?
- 12) LSD と MD の関係は? 例えば, LSD は MD より大きいのか?

#### モデル化 (LSD)

- 13) 境界値問題でダイラタンシーをどう扱うか?
- 14) ダイラタンシーは理想化した断層の周りの地域の弾性的性質や水流等にどう影響するか?
- 15) 割れ目間隙率, 透水性等の推定に基づくダイラタンシー・ディフュージョン・モデルに対する制約は?
- 16) 断層変位に先立つ応力方向の変化や  $b$  値の変化をダイラタンシーで説明できるか?
- 17)  $V_p$  の遅れや他の前兆効果はダイラタンシーなしまたは流体ディフュージョンなしで説明できるか (ドライ・ダイラタンシー・モデル)?
- 18) プレート境界での地震とプレート内部の地震に見かけ上ダイラタンシーに関係した前兆現象に大きな相違はあるか (金森のアイデア)?
- 19) ダイラタンシーをテストするためには, 個々の地震域に関するどのような事実が必要か, そしてこの事実を得るためにもっともよい方法は?

### 3. セッション: 前駆現象に関連した室内実験による観察

#### N.L. CARTER (ニューヨーク州立大学)

以下に掲げるのは, 信頼性ある地震予知とコントロールができるようになるために, 注意深い実験室内での研究により答えられ, また答えられなければならない問題である. しかし, 見逃している他の重要な問題もあることは疑いない. これらの問題や他の問題の解答についての何らかのサジェスションや貢献を大いに歓迎する.

#### 3.1 割れる過程および水の移動の物理的特性

割れる過程の原子的特性についての (主として電子顕微鏡による) 適切な新しい観察があるか? 等方的岩石中の割れ目開口の形および主応力に対する方向は? もし伸張割れ目が卓越しているとすれば, どのように連結して剪断割れ目になるか? 大部分の岩石は異方性があるが (ここでは, 応力によって誘起された異方性ではなく, 鉱物の定方向性や粒子の形による異方性を意味する), 割れ目の形態や方向は異方性にどの程度影響されるか? 等方的な集合体でダイラタンシーが起こるために必要な室温における臨界応力は? 及び, 繰り返し荷重によって次にダイラタンシーが起こる応力は? その臨界応力

に、異方性・材質・変形速度・水の飽和度がどのように影響するか？ ダイラタンシーの大きさは、応力の大きさと履歴に依存するか？ ある特定の応力レベルと履歴のもとで、ある初期間隙率と透水率をもった等方性ないし異方性の集合体の膨張域への水の移動の室温での速度は？

### 3.2 深部におけるダイラタンシーの性質

等方性の岩石及び異方性の岩石でのダイラタンシーとダイラタンシー硬化への温度・圧力・間隙圧・応力・変形速度・間隙流体の化学的性質の効果はどうか？ すなわち、上記のパラメーターによって作られる物理空間の中で、ダイラタンシーが起る範囲と起らない範囲を分ける境界があるか？ もし境界があれば、岩石の種類毎に境界の深度はどの辺にあるか？ 例えば、石英や他の珪酸塩は低温・低変形速度で加水によって弱化的なことが知られているが、 $H_2O$ 中に溶解している塩類によって効果が大きくなるのが期待されるかもしれない。弱化的な状態の効果として、珪酸塩類が間隙もしくは間隙になりうる箇所に入り、流体の移動通路をふさぎ、ダイラタンシー硬化を起すか、あるいはダイラタンシーをまったく起させないか、あるいは他の反応を起すであろうか？ 塑性流動中の交差すべり系での転位の集積によってクラックが開くか、あるいは粒界すべりや他の方法によってクラックが生じる可能性があるか？ このような現象が実際にも起るか？ このように生じたクラックは持続性があるか？ このようなクラックは、ダイラタンシーや断層や地震に如何なる影響を与えるか？

### 3.3 断層面の物理的状態

周囲の岩盤中での前兆現象がすべて分っているととしても、断層のスリップが間近に迫っていることが、断層面自体の材質・不均質性・物理的状態・摩擦特性に関係なく判定できるか？ いいかえれば、両極端として、一方は均質な結晶質ないし硬化した堆積岩中の“クリーンな断裂”と、他方は不均質岩体中のマイル級の幅を持った断層破砕帯(破砕された(時に、固結した)岩石と岩石粉)とを考えた時に、前兆現象に対する反応は同じであろうか？ この挙動は深さに依存するか？ この質問に関する実験室内での観察はあるか？

### 3.4 前兆現象に関する室内実験

各種の前兆現象—  $V_p$ と $V_s$ 速度と比、S波の偏向性、b値、岩石の弾性、体積膨張、重力、電気抵抗、磁場、水の移動、ラドン放出に関する新しい室内観察は？ 特に深部の物理的状態をよりびったりシミュレートするような実験はあるか？ 等方性および異方性の岩石中での地震波異方性およびその変化が地震の時、断層面の方向、主応力の方向と大きさの推定に用いられるという兆候があるか？

## 4. セッション：地かく内の応力状態の現場測定及び地震による測定

### C.B. ARCHAMBEAU (コロラド大学)

- 1) 材料の全体的なあるいは平均の応力状態に関する現場測定は意味があるか？ あるいは測定した応力が局所的なもので、境界面の影響で乱されていて、誤った結果に導いたり、無意味なものではないだろうか？ 巨視的な水圧破砕法は境界面による乱れや点測定による問題を避けうるか？ 浅所での測定では浅い地震発生についての結論を導くにさえ不適当ではないだろうか？
- 2) 地震波速度の異方性の測定は、応力レベルを推理するために用いられるか？ 様々な原因による異方性、すなわち本質的な材料の異方性・ダイラタンシーによる異方性・応力による異方性(これはいづれにせよ小さいが)の観点からの解釈には、そのような測定は不明確すぎて使えないのではないかと？ もし、繰り返し測定を異方性の時間変化の検出に使えば、理論モデルから如何にして応力を推定できるか？ さらに、どんなモデルが適当か？ ダイラタンシー・モデルか？ 塑性変形(リラクゼーション)・モデルか？ あるいは他のモデルか？
- 3) トンネルや地表での現場応力測定を用いて、平均バックグラウンド応力場を推定する(“反転”法により)ために数値モデルが役立つであろうか？ あるいは、多数の独立な現場測定と媒体に関する詳細な知識がなければ、このような試みは解の一意性の欠除により無駄になるだろうか？
- 4) 破壊面上で「境界条件」を正しく(定量的に)定めるのに十分なだけ破壊過程そのものを知っているか？ すなわち、小地震からの地震波放射の解釈から応力の大きさや方向の分布を描く根拠は十分か？

? 理論モデルや実験でしばしば行われているように、「単一破面」での「応力降下」に単純化してもよいか? 特に、破壊面の周囲の初期応力場の空間変化が、地震により観察される(弾性波の)放射場に影響するか? するなら、どのように? さらに、体積のない断層面についての破壊を論じたり、体積のない断層モデルを作ることは論理的に正しいだろうか?

5) 異常S波の観察により応力場を推定するために、人工爆破を有効に用いられるか? あるいは、他のS波発生機構がより重要なので、テクトニックなエネルギー解放と解釈しては誤りを導きやすいか、またはまったく不適當ではないだろうか?

6) 地震による応力降下の測定が正しく行われたとして、その結果を実験室内での測定と比較することは有用か? 条件(境界条件、寸法、変形速度、温度、圧力、材料の性質等)が、この2つのタイプの観測では異なるので、直接比較やリーズナブルな解釈は不可能であろうか?

7) 応力場に関係したパラメーターの、現在の地震による(および測地による)測定には意味があるか? 不精確に測定され、理論づけられているので、そのくらいの信頼度の当て推量以上のインフォメーションは得られないのであろうか?

8) 信頼するに足る根拠のある地球内の応力の測定方法があるか? あれば、何か?

9) もし、地球内の応力の空間的(および時間的)変化を測定できれば、破壊現象を理解するため、または予知するために、この情報を直接用いることができるか? 破壊過程に関する定量的議論ができるようになる前に、応力史・温度・含水率・詳細な化学的性質・レオロジー等を知る必要があるか? 少なくとも、ある程度後者の方が正しいのなら、応力以外に地球内で測定すべきクリティカルな変化量は何か?

#### 5. セッション：地かく内の応力状態とそれに関連する小地震スペクトル、強地震動、地震モデル および摩擦熱発生とそれに伴う熱流量

##### J. N. BRUNE (カリフォルニア大学サンディエゴ)

1) ある地域内では、小地震による応力降下の値に範囲があることが現在解かっているが、もし沢山の応力降下の測定値が得られて、その上限が求められれば、それは現場応力が強度に関係しているであろうか? この上限は現場応力に近いのか、あるいは一オーダー小さいのか?

2) 強地震動のピーク速度と加速度は応力降下とおおよそニアであろうか?  $1g$ より大きい加速度を期待できるか?  $100\text{ cm/sec}$ より大きい粒子速度を期待できるか? 現在観察されている粒子速度と加速度は、現場応力あるいは期待される応力降下の上限を定めるか?

3) 地表熱流量の観測を、地震エネルギーの見積りと組合せれば、断層の浅所(20 km以浅)の現場応力の上限が定まるか? サン・アンドレアス断層上の広い熱流量異常は20-100 kmの間の深度の断層面における平均クリープ摩擦発生を反映するか? それが断層から遠くまでの広いゾーンの地かくの変形によって発生されるのか?

4) 地震断層面における熔融の明確な証拠はあるか? もしなければ、それによって摩擦熱発生の上限が決まるか? そして絶対応力または岩石強度の上限がそれから決まるか?

5) 大きい地震は、比較的単純な断層面に沿う単純な応力降下が、もしくは複雑な空間的・時間的に複数の破壊によってか、どちらでよりよく説明されるか?

6) モデル実験は震源パラメーターの現行の概念を支持するか? モデル実験は、地震モーメント、応力降下、破壊の伝播、地震波放射の方向性について新しい識見を与えるか?

#### 6. セッション：非震性断層現象

##### S. W. SMITH (ワシントン大学)

1) 地震後の余効運動は粘弾性反発(NUR and MAVKO, 1974)によるか、あるいは断層のアフター・スリップ(THATCHER, 1974)によるか?

2) 多くのディスロケーション・モデルから推定されるように、歪みの蓄積は断層の深さの数倍の範囲

に限られるか?あるいはTURCOTTE and SPENCE (1974)が提唱しているようなモデルか?

- 3) 非震性断層変位を説明する物理的機構は?それは断層グーチ層の塑性変形か?あるいは比較的クリーンな面での安定すべりか?水は何らかの役割をするか?
- 4) いくつかの地震の数時間以内前より報告されている非常に大きい変形(例えば,IMAMURA, 1930; KANAMORI and CIPER, 1974)は前兆的な非震性のずれに起因するであろうか?もしそうなら,そのような非震性のすべりはすべての地震に普遍的に存在するか(SCHOLZら(1972)は,実験ではすべて安定すべりが急激なずれに先行することを示している)?
- 5) 伝播するクリープ現象に関する議論(KINGら, 1973).クリープ現象は表面的な現象か?あるいは,多少の深さ(例えば, 10 km)まで達している証拠があるか?クリープ現象に伴う変形または傾動のよい記録はあるか?クリープ現象の急激な開始の原因として,上降伏点による説明(NASON and WEERTMAN, 1973)に代る説明はあるか?
- 6) クリープは地震の前兆か(BUFE and TOCHER, 1974)?地震の後に必ず加速されたクリープの時期(WESSONら, 1973)があるか?震度とクリープの関係の一般的議論.
- 7) 変形の蓄積は,時間とリニアな関係にあるか?あるいは地震の前に加速するか?変形の蓄積の過程は,広い面積にわたる均等な歪み増加の後の中間深度までの断層変位とおそらくそれに続いて深部でのアフター・スリップか(WALSH, 1968)?あるいは,通常のディスロケーション理論から推測されるような,深部でのすべりにより断層近くに歪みが集中し,続いて浅部での破壊とアフター・スリップか?
- 8) 安定すべりの実験:断層グーチの効果(BYERLEE and SUMMERS, 1973),応力(BYERLEE and SUMMERS, 1974)に関する新結果あるいは既存データの再解釈はあるか?

## 7. セッション:地球内の破壊過程の観察,理論およびモデル(破壊の物理)

### J. R. RICE (ブラウン大学)

#### 7.1 マイクロクラックの発生,生長および結合

主として圧縮応力のもとで剪断応力を受けている岩石中のマイクロクラックの生長開始とその結果生じるクラックの方向と軌跡をどう描写するか?隣り合う割れ目間の干渉と結合はどのようなか?地下水の存在下で応力腐食割れは重要な役割を持つか?もしそうなら,生長の下限界応力拡大係数はどのくらいか?メカニズムはどうか?そして,応力拡大係数と進展速度の如何なる関係が過程を説明するか?

#### 7.2 破碎され,水で飽和した岩石の巨視的性質

巨視的な連続体として岩体を見た場合,一般的な組合せ応力状態で,リーズナブルな一般的応力経路(繰り返し応力を含む)での応力-歪関係は?割れ目の摩擦すべり,さらに微小破壊およびそれから生じる巨視的ダイラタンシーと異方性も,もちろん議論に含まれるべきである.また,もし応力腐食あるいは他の原因の時間依存性が微小破壊にあれば,巨視的応力-歪関係にどう反映するか?弾性波速度や電気抵抗のような観測可能な巨視的性質を,破壊と間隙流体の状態(気体,液体)を知るために用いることができるか?流体で飽和している場合,変形している岩体と間隙流体との力学的反応はどうか?Terzaghi-Biotの有効応力説の適切な記述は?流体を(温度に加えて)間隙圧という1つのパラメーターで特徴づけることは正しいか?少なくとも液体で満たされた割れ目の傍に,蒸気で満たした割れ目やドライな割れ目が共存するかもしれない.ダルシーの法則の正しい記述または一般化は?そして破碎の程度を定めるパラメーターとともに透水率はどう変わるか?

#### 7.3 ダイラタンシー硬化,歪の不安定性と集中

以上で期待された正しい記述が与えられたとして,あるいは現実にはその初歩的近似が与えられたとして,流体で飽和した岩石のダイラタンシー硬化の程度を予測できるか?すなわち,間隙流体にどの程度の圧力低下が起きるか?圧力低下が起きた場合,周囲の岩石の間隙圧と同じ時(すなわち排水条件)に比べて,どのくらい岩体の剪断力に対する抵抗を増大するか?ダイラタンシーによる間隙圧低

下によって、急速な剪断破壊に対する岩体の安定化が起きたと考えてもよいか？ 特に排水状態では狭い剪断帯への変形の不安定集中が起るような破碎状態に達している時でも、ダイラタンシー硬化した変形状態は安定か？ より一般的に、断層帯を作る不安定な局地的剪断の開始はどのようにモデル化されるか？ 以上に暗示されているように、巨視的に滑らかで連続的な変形場の応力-歪関係によって記述される準安定変形過程における不安定化点として理解できるか？ 既存の断層形成によって機械的性質が不均質で、またおそらく前の断層変位によって断層域が不均質な応力状態にあるような岩体に関して報告されたこの種の研究があるか？ 相変化によって誘起された応力または変形は、不安定変形集中のもっともらしい原因であろうか？ そして、これは如何にモデル化されるか？

#### 7.4 断層帯の本質的モデル

断層帯中の岩石の力学的性質はどうか(あるいは異なったタイプと場所での断層の力学的状態の変化の範囲は)？ 細かく粉砕された粘土または他の土粒子程度の大きさの粒子の層か、あるいは緊密に充填された割石のゾーンか、あるいは互いに密着した岩体群を考えるべきか？ 連続体中の不連続面とした断層モデルは適切か？

そして、もし断層を巨視的に不連続面と考えれば、隣接した連続体間に作用するすべり抵抗はどのような性質を持つか？ 特に、局所的垂直応力、間隙圧(もし定義できれば)およびすべりの量と速度に關係して、断層の一点での局所的な剪断強度はどうか？ そして、どのような物理過程がこの関係を決定するか？ いくつかの可能性：静摩擦、少しのすべりで断層帯の破碎岩が緩むことによる強度低下、誘起間隙圧低下と摩擦増大による安定化、動摩擦対静摩擦とスティック・スリップ、局部的熔融、相転移、そしておそらくそれ以外にもいくつかの要素があるか？

#### 7.5 断層の安定変位と不安定変位

前述の断層面の本質モデルは、準安定もしくは非震性滑動の可能性を認めるか？ すべりの速度と、安定を失なって急激な断層変位を起す可能性とを支配するファクターは何か？ 流体圧入によって、断層変位と応力緩和を人工的に起す計画に關して、断層モデルからなにをいえるか？

断層活動の開始、動的拡大および活動の最終的停止の条件は？ 弾性的応力場の解により、最大引張り応力が断層の先端で断層面に対してある角度をなす(低速度で約 70°)場合に、なぜ巨視的断層が剪断割れ目の形で伝播するか？ 実際に、見かけ上マイクロクラックは剪断では成長できないで、代わりにその先端から引張り割れ目に分岐するように見えるが、それに似た巨視的な分岐が断層の活動を止めるファクターになりうるか？ どのようなファクターが、地震学的に求められた応力降下と、実験室での強度や摩擦のデータによるずっと大きい応力変化との間の相違のパラドックスを説明するか？

#### 7.6 強化の過程

断層形成後に強度が回復するもっともらしい物理機構はあるか？ 流体で飽和した岩石で、セメンテーション反応は可能か？ 断層帯中の高度に破碎された岩石、おそらくラブル(rubble)は急速な変位の後の準静的変形によって、より密な、したがってより強いパッキング状態になりうるか？ 他の可能性はあるか？

### 参 考 文 献

- BRACE, W. F., PAULDING, B. W., Jr. and SCHOLZ, C. (1966) Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, vol. 71, p. 3939-3953.
- BRADY, D. T. (1974) Theory of earthquakes—Part I—A scale independent theory of rock failure. *Pure Appl. Geophysics*, vol. 112, p. 701-725.
- BUFE, C. G. and TOCHER, D. (1974) Central San Andreas Fault: Strain episodes, fault creep, and earthquakes. *Geology*, vol. 1, p. 205-207.
- BYERLEE, J. D. and SUMMERS, R. (1973) The effect of fault gouge on the stability of sliding on saw cuts in granite. *EOS (Trans. Am. Geophys. Un.)*, vol. 54, p. 1210.
- and ——— (1974) Fault creep as a function of confining pressure. *EOS (Trans. Am. Geophys.*

- Un.), vol. 55, p. 428.
- FRANK, F. C. (1965) On dilatancy in relation to seismic sources. *Reviews of Geophysics*, vol. 3, p. 485-503.
- GOODMAN, R. E. (1976) *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*. West Pub. Co., St. Paul, 472p.
- 星野一男(1974) 果して地震の前に岩石は膨張するか—ショルツの予知理論とは—。地質ニュース, 233号, p. 37-45.
- IMAMURA, A. (1930) Topographical changes accompanying earthquakes or volcanic eruptions. *Publ. Earthquake Inv. Commit. in Foreign Lang.*, vol. 25, 143p.
- KANAMORI, H. (1973) Mode of strain release associated with major earthquakes in Japan. *Annual Review of Earth and Plan. Sciences*, vol. 1, p. 213-239.
- 金森博雄(1974) 新しい地震観。地球の物理, 丸善, p. 261-282.
- KANAMORI, H. and CIPER, J. J. (1974) Focal process of the 1960 Chilean earthquake. *EOS (Trans. Am. Geophys. Un.)*, vol. 55, p. 430.
- and ——— (1974) Focal process of the Great Chilean earthquake May 22, 1960. *Physics Earth Plan. Sci.*, vol. 9, p. 128-136.
- KING, C. Y., NASON, R. D. and TOCHER, D. (1973) Kinematics of fault creep. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, vol. 274, p. 355-360.
- 小出 仁(1969) 岩石中の割れ目の発生と発達について—圧縮応力下における割れ目発生源—。岩石物性研究会会報, no. 7, p. 1-16.
- (1975) 第2回破壊力学と地震源機構に関するペンローズ会議に出席して。地質ニュース, 255号, p. 19-25.
- KOIDE, H., HOSHINO, K. and NAGUMO, S. (1970) Microscopic mechanism of the development of rock failure. *Rock Mechanics in Japan*, vol. 1, p. 62-64.
- MATSUSHIMA, S. (1960) On the flow and fracture of igneous rocks. *Dis. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ. Bull.*, no. 36, p. 2-9.
- MJACHKIN, V. I., BRACE, W. F., SOBOLEV, G. A. and DIETERICH, J. H. (1975) Two models for earthquake forerunners. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 113, p. 169-181.
- , KOSTROV, B. V., SOBOLEV, G. A. and SHAMINA, O. G. (1974) Лабораторные и Теоретическце Исследования процессов подготовки Землетрясений: Физика Земли, Ио. 10, стр. 107-112. (岸本文男訳: 地震前過程の実験的および理論的研究。地調月報, vol. 28, 1977, p. 185-189).
- 茂木清夫(1974) 岩石破壊と地震予知。材料, vol. 23, p. 320-331.
- NASON, R. D. and WEERTMAN, J. (1973) A dislocation theory analysis of fault creep events. *J. Geophys. Res.*, vol. 78, p. 7745-7751.
- NUR, A. (1972) Dilatancy, pore fluids, and premonitory variation of  $t_p/t_s$  travel times. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 62, p. 1217-1222.
- and MAVKO, G. (1974) Post-seismic viscoelastic rebound. *Science*, p. 204-206.
- SCHOLZ, C. H., SYKES, L. R. and AGGARWAL, Y. P. (1973) Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, vol. 181, p. 803-810. (中村一明訳: 地震予知の物理的基礎。科学, vol. 43, p. 541-549).
- STUART, W. D. (1974) Diffusionless dilatancy model for earthquake precursors. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 1, p. 261-264.
- THATCHER, W. (1974) Strain release mechanism of the 1906 San Francisco earthquake, *Science*, vol. 184, p. 1283-1285.
- TURCOTTE, D. L. and SPENCE, D. A. (1974) An analysis of strain accumulation on a strike-slip fault. *J. Geophys. Res.*, vol. 79, p. 4407-4412.

WALSH, J. B. (1968) Mechanics of strike-slip faulting with friction. *J. Geophys. Res.*, vol. 73, p. 761-776.

WESSON, R. L., BURFORD, R. O. and ELLSWORTH, W. L. (1973) Relationship between seismicity, fault creep and crustal loading along the central San Andreas fault, in KOVACH, R. L., and NUR, A., eds: *Proc. Conf. Tectonic Prob. San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ. Geol. Sci.*, vol. 13, p. 303-321.