

果して地震の前に岩石は膨脹するか

～ショルツの予知理論とは～

星野一男

まえがき

日本列島の沈没という地質変動を題材にした小説がベストセラーとなって巷の話題となっている昨今 アメリカの一少壮研究者が地震予知について新しい理論を発表し そのうえ わが国の関東地方に数年以内に大地震がおきるであろうという非常に具体的な しかも物騒な予言を行なったというので評判になっている。たとえば48年6月5日の毎日新聞(朝刊)は ほぼ1頁を費してショルツ理論の特集を行なっている。少々抜き書きを試みよう。

地震発生時間 場所 規模を高い信頼度で 予知できると期待される新理論がアメリカで生まれた。水をたっぷり含む岩石の膨脹性に関する「ショルツ理論」といい 世界の地震学者の間で大きな反響を巻起している。地震予知理論の決定版になりそうだと指摘する学者もある。そのショルツ博士が「数年以内にマグニチュード7以上の地震が南関東で起こるかも知れない」と指摘したのだ。9月1日に関東大地震50周年を迎える日本の地震学界は 地震研究の先進国という自信をグラグラと揺り動かすほどのショックに見舞われている。しかしショルツ理論で実際に予知できるのであれば 地震学上はかりしれない意義をもち 地震対策への影響も大きい。そこでショルツ理論とその波紋を紹介する。

というまえがきで始まるこの記事は 衝撃の警告……南関東で数年内に大地震。とか 日本に波紋 新地震予知論。とかいう週刊誌そのけのドギツイ見出しとともに 何よりも ショルツの理論そのものよりも タイムリーなニュースに熱狂するジャーナリズムの昂奮そのものを伝えている如き感じである。これはしかし地震に対する一般社会の関心のおそろしいまでの高まりとして われわれは受け取るべきであろう。

これほどまでの衝撃を日本の各界に与えたショルツの理論とは 1973年の4月18日にワシントンで開かれた定例の米国地球物理学連合年次総会 (Annual meeting of American Geophysical Union, 毎年春にひらかれる米国の地球物理学総会の如きもの。たとえば地質ニュース 124号, 1964: 最近のアメリカの学会からに当時のAGU 年会の寸描がある) で発表された論文 地震予知の物理的基礎 (the physical basis for earthquake prediction) によって公になったものである。それ以前から ショルツの考えについての噂は関係者の間では

すこしづつささやかれていた。新聞で報道されている通り 5月初旬に至ってショルツが直接東大地震研究所に手紙とともに講演原稿を送り とくに日本の南関東の隆起から導いた自説について注意を喚起したために にかに国内で有名になった。

ショルツの考えの伏線となったものは 1966年の Journal of Geophysical Research (AGU の機関誌) に BRACE, PAULDING, Jr. および SCHOLTZ が発表した結晶質岩石の割れ目のダイラタンシー (Dilatancy in the fracture of crystalline rocks) である。ブレイスらはここで 結晶質岩のように孔隙率の小さい岩石ですら 破壊の前には 従来の弾性変形で予想されている体積減少よりもむしろ体積の増大がおこること この増大が破壊前に発生する微小割れ目と関係のあることを述べている。いわゆるショルツ理論が別名をダイラタンシー理論と呼ばれているように ここで述べられた微小割れ目の発生がショルツの考えでは 非常に重要な役割を持っているので まずこの論文の内容をひとわり紹介した上で今回のショルツ論文をご説明しようと思う。

ここではショルツらの考え 理論的すじみち 根拠となった実験データをできるだけ忠実に紹介することを主旨としたい。筆者が岩石破壊に興味を持ち 研究を始めたのはまさに1966年であった。及ばざりしを卒直に詫びなければならぬ。小文はその慚愧の念の証しである。

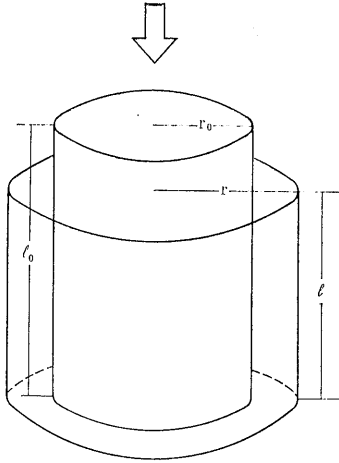
岩石のダイラタンシー

第1図のように半径 r_0 高さ l_0 の円筒を上下方向に圧縮すると軸方向に縮み その代わりに半径は大きくなる。半径 高さがそれぞれ r l に変わったとする。このときの体積の変化は

$$\begin{aligned} \Delta V &= V - V_0 \\ &= \frac{1}{2}\pi r^2 l - \frac{1}{2}\pi r_0^2 l_0 \\ &= \frac{1}{2}\pi(r_0^2 \Delta l + 2r_0 l_0 \Delta r + 2r_0 \Delta l \Delta r + \Delta l \Delta r^2) \end{aligned}$$

ただし $l = l_0 + \Delta l$, $r = r_0 + \Delta r$

Δr Δl は r_0 l_0 にくらべて小さいので第3, 4項を無視することができる。



第1図
半径 r_0 、長さ l_0 の円筒形試体が圧縮応力によって r 、 l と変化する。

$$\Delta V = \frac{1}{2}\pi(r_0^2 \Delta l + 2r_0 l_0 \Delta r)$$

したがって

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 2 \frac{\Delta r}{r_0} + \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

すなわち 原体積に対する体積増加 体積歪は横方向の歪の2倍とたて方向の歪の和である。流体ではたてに押された体積だけ 横に延びるので体積歪は零である。この時 上式を零と置くことにより

$$\begin{aligned} 2 \frac{\Delta r}{r_0} - \frac{\Delta l}{l_0} &= 0 \quad (\Delta l \text{ は減少値なので負号となる}) \\ \therefore \frac{\Delta r}{r_0} / \frac{\Delta l}{l_0} &= \frac{1}{2} \end{aligned}$$

が求められる。しかし 固体では内部に凝集力があるので 横にのびる体積は 押された体積の全部がそのまま“あふれる”ことにはならず 全体積としては減少するのである。 $\frac{\Delta r}{r_0} / \frac{\Delta l}{l_0}$ がポアソン比と呼ばれるものである。弾性体ではポアソン比は物質ごとに一定である。第一表にいろいろな物質のポアソン比を示そう。ゴムのように変形に対して抵抗の少ない物質ほど0.5に近い。岩石は多様であって 大理石や石灰岩のように延性に富んでいるものは大きいが 堆積岩は一般に小さい。硬質の頁岩や凝灰岩にいたってはおそらくどんな固体よりも小さい値を持っている。火成岩類は0.2から0.3の値であるがポアソン比 0.2と0.3の岩石では(1)式によって計算するとたて歪 1/100 すなわちたて方向に1%押されたときに それぞれ $\Delta V/V_0$ が -0.006 と -0.004 となって0.6および0.4%の体積減少をすることになるである。もう一度繰り返すと 弾性体では圧縮

第1表 種々の物質のポアソン比

物 質	ポアソン比
ゴ ム	0.49
鉛	0.43
鉄	0.29
砂 岩	0.10 - 0.14
頁 岩 (硬 質)	0.05 - 0.07
泥 岩	0.12 - 0.14
石 灰 岩	0.26 - 0.28
大 理 石	0.30 - 0.40
花 崗 岩	0.21 - 0.24
玄 武 岩	0.22 - 0.25
凝 灰 岩 (硬質)	0.08 - 0.12

力をうけて変形する時には体積は減少するものであるし通常の固体では現実にそのような性質が普遍的なのである。

これだけの予備知識を前提にしてブレイスらの論文に入ろう。金属などの固体では変形に際しては 弾性モデルから帰納される予想どおり体積減少をするのだが一部の岩石については 逆に増大する例がそれまで屢々報告されていた。ハンデン (1963) やブリッジマン (1949) などの報告であるが 京都大学の松島昭吾(1960) はしっかりした実験室の測定をもとにして 体積増加を数値的に示した最初の一人と言ってもよいであろう。

ブレイスらは 岩石は一般的に高圧下では このような体積増加をする性質があるのではないかと考えて実験を行なった。試料として使ったのは次の3種。

- Westerly 花崗岩。アメリカ北東部産でグリッグス パーチ以来アメリカの高圧研究者によりよく使われる試料である。粒径は0.75から0.50mm。孔隙率0.9%。密度 2.621gr/cm³。
- 大理石。産地不明。粒径 0.2mm。ほぼ純粋の方解石よりなる。
- アプライト。南アメリカ Central Witwatersrand 産。63%の灰曹長石と27%の石英を含む。また10%の黒雲母が含まれる。密度 2.64gr/cm³。粒径は石基 0.44mm 斑晶が 0.1mm 前後である。

充分な記載はないが孔隙率はいずれも1%前後であると思われる。これらの岩石試料を使って常圧から最大 8,000kg/cm² の側圧下で実験を行なった。その結果をここに引用してみよう (第2図)。

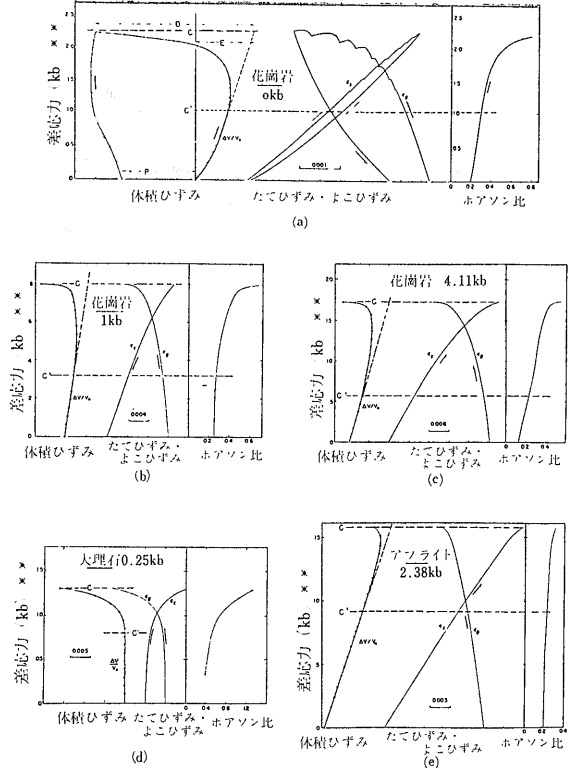
図はどちらも3つの部分から成り立っている。左側が体積変化をあらわす曲線。中央がたて歪と横歪の変化。右側がポアソン比の変化である。第2図 a は

Westerly 花崗岩の常圧の場合である。まず中央から見るのがよいであろう。図の ϵ_x ϵ_θ はたて歪 横歪を示す記号である。 ϵ_x と付せられた曲線が通常応力—歪曲線として示されるものである。横軸が歪を表わし 2目盛が 0.001 である。たて軸が差応力であって 2目盛が 1,000kg/cm² である。 ϵ_x が 0.002 ぐらいから曲線が小さく屈折を始めるのは実験上の処理のためである。予備テストで強度は 約 2,300kg/cm² と判っているので この場合はその約90% 2,000kg/cm² で停止して 差応力を減少せしめている。左側が体積変化であって横軸が $\Delta V/V_0$ である。タテ軸の目盛は同じなので 中央の応力—歪曲線と比較することにより 変形の進行に対応できる。38頁の(1)式をブレイスらの記号におきなおすと

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 2\epsilon_\theta + \epsilon_x$$

図から ϵ_x ϵ_θ を読み取って $\Delta V/V_0$ を計算できる。この曲線はこの式により 計算して作られたものである。差応力零の点が $\Delta V=0$ の所であり これを規準にして右側が $\Delta V < 0$ 左側が $\Delta V > 0$ の領域である。したがって 図は $\Delta V/V_0$ が当初は減少傾向を続けるが やがて増大に転じ 逐には原体積 V_0 に戻り 更に破壊寸前に近づくとも V_0 以上に増大する結果となることを示している。右側の側がポアソン比である。これも中央の図より ϵ_θ ϵ_x を読み取り その比として求めたものである。ポアソン比は変形の初めごろは 0.2 であるが 差応力の増加とともに増加する傾向を示す。すなわち弾性モデルで規定されている恒数関係は成立せず ポアソン比は一定ではない。ここで注目すべきことは ポアソン比の増加率が変形の当初からある程度の間隔まで一定であることである。破壊点に近づくにつれて増加率自体も急激に増加し 2,000kg/cm² 付近で 0.5 を超え最終点では 0.8 になっている。(1)式と前段での考察から明らかなようにポアソン比が 0.5 を超えるということは 固体では考えられないことであり ここで示された 0.5~0.8 の数値に対しては 試料が当初の組織よりも膨張したという考えを取る以外にはない。ここからダイラタンシーという言葉が使われるようになる。“to dilate” は幅や長さが大きくなる 膨張する 拡張するという意味に使われている。

通常採用されている応力—歪曲線(本図の ϵ_θ 曲線)が直線関係を保っているにもかかわらず(このことは見掛け上 フックの法則にしたがって 弾性体として挙動しているということである) ポアソン比が変動し 膨張



第2図 高圧下で圧縮変形をなす岩石の体積変化(左) たて歪 よこ歪(中央) およびポアソン比(右側) (BRACE, PAULDING, SCHOLTZ, 1966 より)

現象がみとめられたということで非常に重要なことが実験結果として示された訳である。膨張したという明らかな裏付けは ϵ_θ 曲線をたどっても確かめられるであろう。荷重が取り去られたあとでも ϵ_θ は当初の点に復帰せず 0.001 ぐらいの歪がのこっているのである。

これまでの結果を総合してみると これらの試料は普通の試験方法では弾性変形をしているとみられるときでも 内部組織の膨張のために 実は非弾性変形をしているのだということである。

それではこのダイラタンシー(上に見た“膨張”のことを以下原語そのままにダイラタンシーと書くことにする。新聞その他で最近慣用化されているらしいので)はどこから始まるのであろうか。これは以上のさまざまなデータから判定すべきことである。ブレイスらは図に示されているように $\Delta V/V_0$ が当初の減少期にある程度直線関係にあることに注目し この直線関係が破れて増加期に方向転換すると見られる点を決定点とし C' とした。

C' からダイラタンシーが始まると一応考えた訳である。第2図 a では C' が約 1,100kg/cm² であり これに対して破壊点に近いと見做されている C 点は 2,280 kg/cm²

の応力なのでダイラタンシーは破壊応力の約半分の応力値でおこったと考える訳である。全部の実験データでチェックするとダイラタンシーが始まる点は破壊応力の $\frac{1}{3}$ から $\frac{2}{3}$ のところであって平均的には $\frac{1}{2}$ であるという結果が示されている。同じく第2図aではダイラタンシー開始点以後も同様の傾向で $\Delta V/V_0$ が減少したと見做したときの $\Delta V/V_0$ 値を E としてこれを弾性的体積歪としている。現実の $\Delta V/V_0$ 値とこの弾性的体積歪との差を全体積歪とし D で表わした。その比 D/E はダイラタンシーの程度を表わすものとする。実験結果によれば D/E は0.2から2.0の間に分散して一様でない。圧力や岩種による影響はないようである。概してbrittle(脆性的)岩石ほど D/E が小さくductile(延性的)岩石ほど大きい傾向がある。

以上でブレイスらの論調のおもな点は尽きるのだが最後に重要な問題が残されている。ダイラタンシーを起す原因は何かという事である。結論的に言えばブレイスらは破壊の過程で作られる微小割れ目であると考えているらしい。あいまいな表現をとったのはこの点に関する議論の進め方が本論文でははっきりしないところがあるし文中の論拠自体でもブレイスら自身で後に出した論文でこれを否定しているものがあるからである。したがってこの事項に関して原文を順序を追った紹介は余程の註がないと読者を混乱せしめることになるおそれがある。ブレイスらはこの時点では変形のごく当初にすでに原試料孔隙率の約 $\frac{1}{3}$ が微小割れ目であると考えていた。この割れ目孔隙率(crack porosityと呼んだ)は静水圧実験や弾性波速度測定によりほぼ最大主応力に平行する微小割れ目により形成されていると考えた。

ダイラタンシーの原因としての微小割れ目については本論文に関してはこれ以上の細かな紹介はしない方がよいと思うがその後破壊過程に関する研究が進んで(たとえばHOSHINO and KOLBE 1970やSCHOLTZ 1970など)破壊の過程において微小割れ目が成長して行くことは十分に理解されるようになった。現時点で考えればダイラタンシーの原因として微小割れ目を取ることはまず誰も反対しないであろう。

地震予知の物理的基礎—いわゆるショルツ理論について—

冒頭に述べたようにショルツはサイカス(LYNN R. SYKES)とアガルワル(YASH P. AGGARWAL)と共著で4月のAGU大会での講演後に同名の原稿を“Nature”に提出したと伝えられた。地震研究所に付送されたも

のがこれである。その後この原稿は若干書き改められ“Science”に発表されることになった。最終的にScience 9月号(176, p. 252-260, 1973)に発表されたものはこの第2稿を更に若干変更した第3稿であった。第3稿では第2稿の末尾に膨脹域の大きさの章が追加されている。ダイラタンシー領域は地震地域の数倍と思われるが V_P/V_S の異常はダイラタンシーの中心部と外部では大きさが違うので観測上注意を要するという主旨が加えられている。第2稿でより学術論文に戻ったように見えたが社会的反響の大きさに予防線を張った?のではないかと想像する。Science 9月号の最終稿は中村一明氏によって全訳されている(科学 no. 8 vol. 43)。

ショルツの理論といわれるものは別名をダイラタンシーの理論と言われているように前節に説明した破壊過程でのダイラタンシー現象をもとにしている訳であるが1966年以降ブレイス門下(ショルツもその一人である)の人々によって行なわれてきた岩石破壊過程に関する諸研究が礎になっている(末尾の文献参照)。以上2の原稿をもとにショルツ理論と呼ばれるものの実態をたどってみよう。第一次原稿と第二次原稿と骨子にはほとんど変更はないが全般的に第一次原稿に強くあらわれていた地震予知に対する方法論をPRするといった派手な調子は第2次原稿ではかなり薄められ通常の学術論文に近い落ち着いた内容に戻っている。ここでは主として第2稿に基づいて解説する。

ショルツらは“地震学者や占星術者にとって長い間の唯一と言ってよい目標であった地震の予知は地球科学や物性科学の最近の進歩によって間もなく現実のものになろうとしている”と始める。

傾動運動や地形変化 孔隙圧 電磁場 ラドン放射や大小の前震などの各種の前兆現象が地震の前に観測されていた。数年まえまで多くの地球科学者はこれらの観測が正しいものかどうかについて疑問を持ちそれが普遍的なものであるという考えには否定的であった。しかし前兆現象を捕えようとする活潑な計画がとくに過去5—10年間日本やソ連で進められた結果この種の現象が存在することについて疑問の余地がなくなって来たのである。1969年にソ連の中央アジア Garm 地域でおきた中程度の地震の前にたて波と横波の比 V_P/V_S が変化することが発見された。ほぼ同様の結果が最近ニューヨーク州の Adirondack 地域でおきたいくらか小さい地震について報告された。有名な災害をもたらした1971年2月のカリフォルニア州 San Ferrando 地震の3年半前にも速度変化の異常があったことがわかり少なくともある種の大地震の予知に前兆現象が役立つであろうことは疑問の余地がない。

著者らの目的は多くのあえて言えばすべての浅発地震には前兆現象がおこることを示し いままで無関係と考えられていた

前兆現象が共通の物理的原理を持っていることを示すことである。これらの前兆現象は地震のまえに地震の規模に応じて増加し、震源地域のクラックの伝ば速度と流体の拡散速度に関係している。ある長さの時間におこるものである。ここで重要なことは、野外観測で見出された各種の前兆現象のすべてが実験室における岩石物性的研究からすでに報告されていることである。したがって観察、データ解析、研究の一連の過程を遂行することによって多くの地震について、時期、場所、規模を予知できるあきらかな見通しを持つことができるのである。幸運なことに前兆変化の機構は予知が確率的ではなく、決定的に可能であることを示しているように思われる。

(ダイラタンシー模型)

ソ連やアメリカの Adirondacks では地震の前に V_P/V_S が異常に減少した徴兆があり、この異常がもとに戻った直後に大地震がおこっているのである。

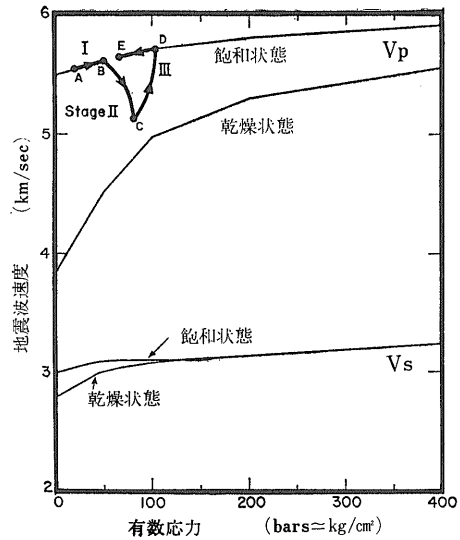
この現象を説明するために NUR や AGGARWAL が考えたのが、先に紹介した岩石の室内実験にもとづくダイラタンシー模型であって、破壊前に微小クラックのために非弾性的変化を行なうという結果をもとにしたものである。ショルツ理論の基本になるものは第3図である。Nurらはダイラタンシー過程の岩石を、水で飽和した場合と乾燥した場合とで V_P と V_S の速度変化を測定したのである。その結果が第3図である。横軸に有効応力（封圧あるいは側圧より孔隙圧を減じたもの）を取ってある。たて軸が弾性波速度である。 V_S すなわちS波速度は乾燥、飽和いずれの場合もほとんど変化していない。

一方 P 波速度にはきわめて特長ある変化があらわれることになっている。乾燥時には速度は有効応力に応じて単調に増大するだけであるが、飽和の場合にはある段階で P 波が一旦かなり顕著に減少し、再びもとに戻る。

……………第1段階では単に造構造が蓄積され、それにより緩りした定常的な有効応力の増加がおこったところである。B点でこの応力が孔隙水が新たに作られた孔隙中に流れ込むよりも速い速度でダイラタンシーを作りだす程に充分な大きさに達したとする。ここで岩石は未飽和となり V_P は低下しはじめ \overline{BC} にそって下降する(第2段階)。 V_S は水の存在にほとんど影響をうけないので V_P/V_S は減少することになる。

ここで重要なのはこれらの速度変化が有効応力に応じて変わるということである。このために次に述べるダイラタンシー硬化という特有の現象を生じ、速度比減少の範囲が拡大する。

第2段階でダイラタンシーを生じた地域では、新たに開口するクラック中に水が流れ込むために孔隙圧は低下するであろう。有効応力は封圧から孔隙圧を減じたものであるから、孔隙圧が低下することは有効応力が増大



第3図 高圧下における乾燥および水-飽和状態での P 波、 S 波の速度変化 (SCHOLTZ, SYKES, AGGARWAL より)

することである。一方、岩石の強度は封圧ではなく有効応力により決定されるものであるから、有効応力が増大することによって今まで破壊が及んでいなかった地域まで、破壊過程が進行することになり、微小破壊の領域は拡大し、したがってダイラタンシー領域は拡大する。

これをダイラタンシー硬化というのである。この拡大作用は、ダイラタンシー領域内に流入する水の速さがダイラタンシーの拡大よりも速くなり、ダイラタンシー硬化が終る点、第3図のCまで続く。点Cで新たに作られた空隙が水で飽和され始めると、 P 波速度は飽和値まで恢復するために \overline{CD} に沿って増加し始める。岩石が完全に飽和された点Dで V_P/V_S は正常値に戻る。

ここで重要なことの2番目として、孔隙圧は \overline{CD} に沿って更に減少を続けると考えていることである。C点は微小クラックの生産がストップする時点であり、水の流入は、その後も引づき行なわれるから、孔隙圧は減少傾向を続ける。完全に飽和された点で始めて増大傾向に転ずるので、点Dは孔隙圧の最小点である。孔隙圧が減少傾向にあるうちは、有効応力は増加するので \overline{CD} は図のように右上りの曲線となる。D点に至ると飽和状態であるために、 P 波速度は図で飽和状態と書かれた線を滑ることになるが、孔隙圧は増加傾向に転ずるので向きは左方向へ進むことになり、図の \overline{DE} をたどる。E点はすなわち、孔隙圧が平常値に戻ったところである。これで V_P/V_S は完全に正常値に戻ったことになる。

3番目に重要なことは、何が、何時、大破壊につながるかということである。ショルツらの説くところを聞こう。

……………造構応力は ダイラタンシーが進む間は増加しつづけるであろうから DEに沿って増加傾向にある孔隙圧は地震発生の引き金の役目を果たすであろう。丁度 孔隙圧の増大が流体貫入や鉱槽充填を引きおこすように、実験室で摩擦とフラクチャーのデータを比較した結果では 適当に工合のよい方向にある断層に沿って摩擦性滑動を生ずるのに必要な応力は割れ目の生じていない同じような岩石のダイラタンシー領域の中のそれと同じである。ダイラタンシーは したがって断層上の孔隙圧を減少させる働きをもち 地震発生をおくらせるが孔隙圧が回復したときにはその引き金になることになる。この時間間隔はダイラタンシー成長速度と 水がダイラタンシー域に流入する速さによって決まる。後者はダイラタンシー帯の広がりによりきまるので 結局はダイラタンシー異常の継続時間は そのあとで生起する地震の大きさの函数であるということになる。

ショルツらは ここで“引き金”は孔隙圧の増大であること ダイラタンシーにともなう孔隙圧減少があつてつづき地震発生時間をきめるという非常に重要なことを言っているのだ がこの辺の説明は必ずしも明決ではない。前段のところはおそらく 孔隙圧増大にともなう摩擦係数減少のことを指しているのだらうと思われる。 そうだとすればこの辺のところは定量的な議論でないとして引き金となり得るかどうか言い切ることは難かしいのではないだろうか。 もっとよい別の説明の方法も考えられる。

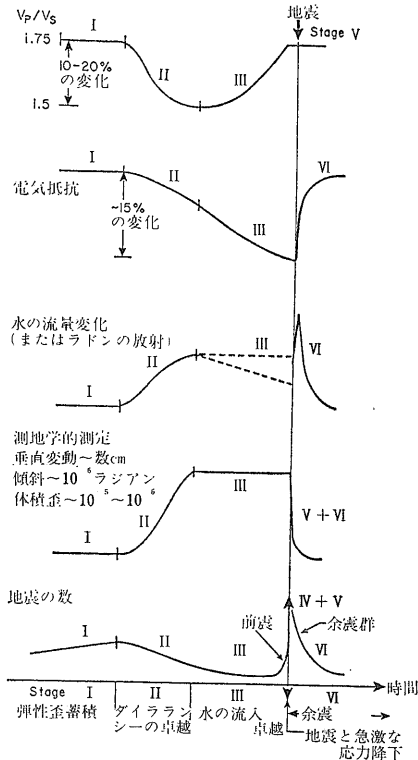
後段は地震予知にとってもっとも重要なところなのだが 一応定性的には1つの論理がある。ここはむしろ第5図にみるような field data をまづ眺めた方がわかりやすい。この図の説明はあとに述べるが要するに前兆間隔と地震変動の大きさは比例するという表示である。

このデータの説明として このような論理をまとめたのであろうが 非常に興味ある着想であるともいえるし非常に重大な多くの問題を含んでいるともいえる。

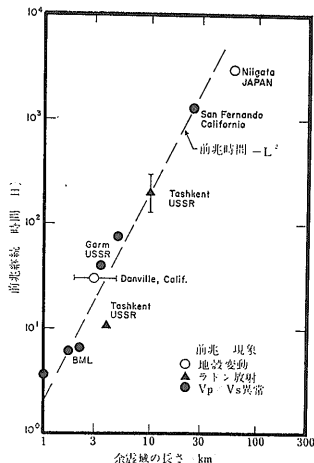
以上が ショルツらの基本的な考えなのだが ショルツらはこのモデルによって いままでの観測 事象がほとんど説明できるとする。第4図がその概念図であるが そのまえに ショルツらがこのモデルを作った 直接のきっかけとなった自然地震の1例として 1971年に Blue Mountain Lake 地域でおこった群発地震が如何にダイラタンシー模型と適合するかをみてみよう。第6図のAはもっとも明瞭である。6月20日にマグニチュード3.1の地震がおこったがその6日前から V_P/V_S は正常値約1.75の線から下降をはじめ 1日前に正常値に復した。7月10日(B) 7月21日(C)のマグニチュードにしてそれぞれ3.3および2.5の地震のときには6.5日 5日前から減少が始まり 正常値に戻った50から30時間後に地震がおこっている。 V_P/V_S 異常が終った時から本震がおこるまでの時間は異常継続全時間の15から25%である。先に説明したように 模型によれば第2段階と第3段階のはじめには ダイラタンシー硬化のために地震活動は 減少すると予想されるが 図のEではそのあたりにマグニチュード1以下の小地震の頻度と最低となっていることが読みとれるであろう。またマグニチュード3.1(A)に対する異常期間は マグニチュード3.3(B)に対するものよりも短いが マグニチュード2.5に対するものよりも長いというまことに都合のよい資料が示されている。

(地震の前兆現象)

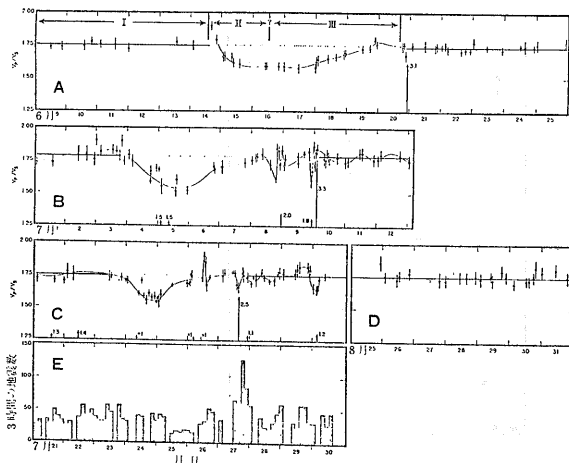
ショルツらの主張で重要なことは 以上の速度比の減少のほかに幾つかのはっきりした前兆現象があり これらは本質的にダイラタンシー模型で説明できるということである。これらの事象は早期に観測し得るものであるので地震予知に有数な手段であるといっている。彼らによればこれらの前兆には2種類ある。1は短期効果というべききもので かなり大きな地震であっても 数時間から数日前にならぬと見られないものであり 2は長期効果というべききもので月とか年の単位であらわれるものである。長期効果の大部分は地震波速度比の異常を説明するために導入されたダイラタンシー機構と同じ



第4図 ダイラタンシー模型による(上から)速度比変化 電気抵抗 水流変化 地形変動 地震数変化の変動模型 (SCHOLTZ, SYKES, AGGARWAL より)



第5図 地震変動 ラドン放射 速度比変化などの前兆継続時間は余震域の規模(長さ)に比例する。(SCHOLTZ, SYKES, AGGARWAL より)



第6図 Blue Mountain 地域における弾性波速度比の日変化 (SCHOLTZ, SYKES, AGGARWAL より)

ものに帰納できると考えている。第4図がこれら前兆現象の一覧である。最上部が速度比変化であって10から20%の減少があるであろうと述べている。

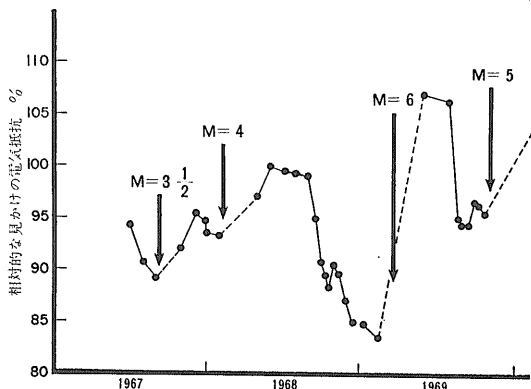
2番目が電気抵抗の変化である。ソ連の Garm では 1967年以来 6km の長い基線に沿って抵抗値の測定が行なわれており 記録によると地震に際しては抵抗値が減少することが示される(第7図)。抵抗の減少は孔隙水の水分が増大したと解することによって説明されるのである。

3番目が水流速度あるいはラドン放射である。タシケントでおきた1966年の地震に際してのデータが第8図である。地震前数年前にラドン量が急速に増大して平常値の2倍にも達し 地震後に急減しているのである。ラドンの半減期はわずか3.8日であり 1生の分子拡散距離はわずかに数センチなのでこの現象の説明としてはクラッキングによる表面面積の増加あるいは孔隙水の流量増加を考えるべきであろう。

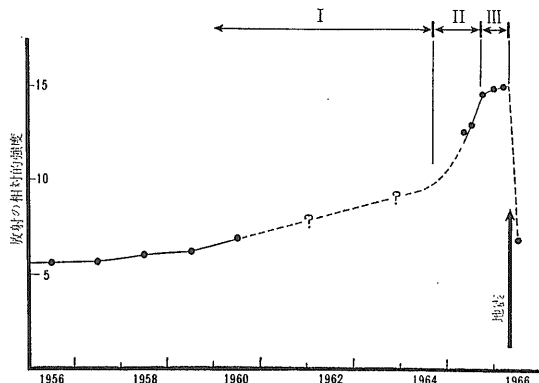
4番目が地盤変動で これがおそらく最も重要である。ダイラタンシーの第2段階すなわちクラックが開口し 体積増加がある段階には速やかな地殻上昇がおこるはず

である。ダイラタンシーが緩漫化した第3段階ですすでに孔隙水はダイラタンシー域に流入しつつあり 垂直上昇はきわめて僅かである。地盤変動の大きさは V_p/V_s の異常を生ずるに必要な実験データからみて 10^{-6} から 10^{-5} のオーダーであり もし ダイラタンシー帯が十分に大きく また浅い深度であれば数センチ単位の上昇を生みだすはずであると考えられる。ショルツらがここで引用しているのは1964年の新潟地震 ($M=7.5$) である。このとき1958年から震央地域で5センチに達する隆起が始まったという資料がある。このときの震源域の広がりには10キロ四方の広がりを持っており 5センチの隆起は 10^{-6} — 10^{-5} のオーダーにほぼ妥当な値を示している。他に1971年のカリフォルニア地震の例が言われている。新聞で報道されていた南関東での大地震を予想したというのは 正にこの種のことを言っているのであって 伝えられる房総南端の隆起は 南関東域がダイラタンシー模型の第2期にあることを示していると言うのである。

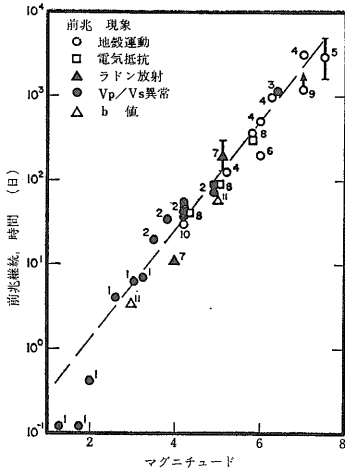
最後は前震現象である。ショルツらはここでとくにダイラタンシー硬化の影響を重要視しているようである。



第7図 ソ連のGarm地震前に観測された電気抵抗の異常 (SCHOLTZ, SYKES, AGGARWAL より)



第8図 1966年のタシケント地震における深井戸のラドン放射異常 (SCHOLTZ, SYKES, AGGARWAL より)



第9図 各種の前兆現象の継続期間と地震のマグニチュードは比例する。(SCHOLTZ, SYKES, AGGARWAL より)

この影響によって地震のしばらく前には異常な静穏期をまた主震の直前には短期間の活発化した活動期を生み出すのだと言っている。ダイラタンシーを考えないとすれば地震活動は主震にいたるまで漸増を続けるはずであると言っている。(この点に関してはわれわれの実験

結果では乾燥状態でも同じような変化が観察されており必ずしもすべての場合にダイラタンシー硬化を考えなくともよいのではないかと考えている。)

(前兆現象の継続期間)

ショルツらは最後に前兆現象の継続時間と地震の大きさには関係があり地震の大きさは予測できるのだという。防災という事からはこれまた非常に重要な議論である。第9図がその図である。地殻変動をはじめとする各種の前兆現象がある大きさの地震前にどのくらい長く続いたかをプロットした。継続期間Tに対して $\log T \propto M$ (Mは地震のマグニチュード) という関係が成り立つという。

ここでTは模型の第2 第3段階の長さを取るのである。同じマグニチュードに対してさまざまな異常から求められた時間がよく一致していることはすなわちそれらの異常の原因が共通の物理的機構にもとづくからであると述べている。5図は地震の大きさの代わりに地震の余震帯の長さをパラメーターとした図である。第5図より $\tau = L^2/c$ (Lは余震帯の長さ cは常数) の関係式が求められる。この実験式は多孔質媒質中の流れを記載する拡散式

$$\frac{\partial P}{\partial t} = c \nabla^2 P$$

(ここでPは流体の圧力 tは時間である) とよく調和する。上式のcは流体拡散係数であって $c = k/\eta\phi\beta$ である。kは岩石の滲透率 η は孔隙流体の粘性 ϕ は孔隙率 β は孔隙流体の圧縮率である。第5図より $c = 5.8 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{sec}$ を得 これより $\beta = 3.2 \times 10^{-5}/\text{bar}$

$\phi = 10^{-3}$ $\eta = 10^{-2}$ ポアズとすると $k = 2\text{md}$ (ミリダルシー) を得る。これは花崗岩試料の $0.35 \times 10^{-3}\text{md}$ や節理をもった岩石の 10^3md に比較するとその中間であり大きな断層を含むダイラタンシー容積岩層に対しては不合理な値ではないと言っている。

まとめとあとがき

この原稿を書き始めたのは梅雨が終わった頃であったが時々中断しては頁を進めているうちにもショルツ旋風はすさまじく総合雑誌にまでショルツ博士特別寄稿と題する論説が載るようになってしまった。

ショルツの考え方提起した問題など以上を読んで頂けば理解してもらえることと思うがショルツの今回の論文で世にもたらされたものは理論というよりもショルツ式の(地震予知)法というべきでないだろうか。くりかえしになるがショルツの方法が作られたいきさつその枠組はこのようなことである。

1. 最近になってソ連とアメリカで地震前に地震波速度比が減少する事実が明らかになった。
2. NUR や AGGARWAL という人がこの観測事実を説明するために数年前プレスやショルツらが行なった仕事もとにダイラタンシーという実験室でキャッチされた現象をあてはめてみた。これは成功したかに見えた。
3. このためにダイラタンシー模型の真実性がみとめられるようになった。換言すればダイラタンシーが実際の地震の前に地殻中で起こっていることについての傍証が得られたと考える人がでてきた。ショルツはもしそうであればダイラタンシーに伴っておきる他のいろいろな地殻や内部物性の変化も当然地震前におこるに違いないと考えた。そしてこれらを観測して行けば地震の予知は可能であると言いつつ切った。

問題点として挙げられるのは

1. ダイラタンシー模型と現実の自然地震現象との間にはなお埋めなければならないいくつかの問題がある。地下10km 20kmあるいは100kmの深部でも地震がおこっているのであるがこれらもダイラタンシー模型で包含するとすればそのような深部における圧力・温度(100kmで約3万気圧 700°C)下で存在していなければならない孔隙 水の状態はどんなものなのか。このことはショルツの方法で予測できる地震の大きさ 深度の限界はどこまでかということにも関係する。
2. ダイラタンシーの模型はぜい性破壊に対してのアイデアであるが流動性の状態にある深部の地殻に対してどの様な形で適用ができるのか。
3. ダイラタンシーの原因として微小割れ目が挙げられている

が その実態はどのようなものなのか。また これと破壊 (主地震) との関連はどうか。

4. 岩石にせよ 地層としてみるにせよ 地質的にも 物體的にも多様性のものであるが 破壊過程や破壊の性格を単一のモデルで律しきれぬか。

などであろう。

最後に筆者が何よりも強調しておきたいのは 今回のショルツ論文は一人の英雄的成果なのではなく アメリカという国で過去半世紀の間に積み上げられた高压研究の地味な実績の上に芽を出し たまま 地震におびえる人々の間で もてはやされた1茎の野花なのだという事である。もちろん この花はショルツを得て始めて咲き出ることができたのだが その前に彼の師 プレイス 更にプレイスの師 パーチがハーバートやMITに拠って高压機器の改良を重ね 後進を育成した背景の方がはるかに重要である。 卑近なたとえで言えばショルツがアメリカ以外の国に生まれていれば この仕事をなし得たかどうか疑わしいと言えよう。

さて 日本に戻って考えれば われわれは徒らに時流に乗せず われわれ本来の道を進むべきであろう。 地殻の破壊現象の本質の90%はまだ未知である。最後の鍵は地殻の構成物質の実態をもっともよく知っている人々によって開かれるのがもっとも自然なのではないだろうか。 地質調査所は 国立機関として その重責を担っていることを理解しなければならないと思うのである。

〔謝辞〕 本稿を書くに際して地震研究所の茂木清夫 中村一明 両氏から いろいろのご援助を頂いたことを附記し お礼申し上げます。 (筆者は 実験地学グループ)

文 献

必ずしも今回のショルツ論文のみの参考文献ということではなく ショルツらの仕事の流れを解説できる様なものを書いた。

まず文中で紹介したダイラタンシーに関するもの。

2. BRACE, W. F., PAULDING, Jr. B. W., and SCHOLTZ, C. (1966): Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, J. G. R. 71-16, p. 3939-3953.

この前にプレイス一派は所謂 Griffith crack と破壊論の研究を盛んに行っていた。たとえば

2. BRACE, W. F., and BOMBOLAKIS, E. G. (1963): A note on brittle crack growth in compression, J. G. R. 68-12, p. 3709-3713.
3. BRACE, W. F. (1964): Brittle fracture of rocks, State of stress in the Earth's crust. p. 111-178.

しかし Griffith crack のみでは破壊の成長を説明することが難しいことがわかってくる。大学院をでたショルツは当初破壊過程の研究を行なった。

4. SCHOLTZ, C. H. (1968): Microfracturing and the inelastic deformation of rocks in compression, J. G. R. 73-4, p. 1417-1432.
5. SCHOLTZ, C. H. (1968): Experimental study of the fracturing process in brittle rock, J. G. R. 73-4, p. 1447-1454.

この間 プレイスらは高压下の電気抵抗変化の研究を盛んに行っていた。

6. BRACE, W. F., ORANGE, A. S. and MADDEN, T. R. (1965): The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks, J. G. R. 70-22, p. 5669-5678.
7. BRACE, W. F. and ORANGE, A. S. (1968): Further studies of the effects of pressure on electrical resistivity of rocks, J. G. R. 73-16, p. 5407-5420.

新刊紹介

プレートテクトニクス批判

新しい地球観をめぐる
ソビエト構造地質学

本書は標題からも分る通り 最近の新しい地球観といわれたプレートテクトニクスに対して ソビエトの構造地質学者が批判した論文6編を編訳したものである。

この問題に関してはすでに1968年にも公開論争が行なわれ本誌189号にも載せられている。それ以来データの積み重ねも増加し 当時は一方から疑問視されていた海底の地磁気異常の縞模様も認めた上での成因解釈をするなど議論の発展がみられる。

全6編の中4編はペロウソフが占め 大陸の大洋化を主張して 大陸漂移に反対するとともに 大陸と大洋の移行帯の研究の重要性を力説している。しかし主張さ

れている「大洋化作用」も充分説得力があるとはいいい切れない。最後の論文はより慎重であり 移動説と固定説を止揚するものとして 新しい膨脹説を述べており いずれもが深部構造の研究を重視している。

プレートテクトニクスについては別冊「サイエンス」に大陸移動が特集されており 併せて読むとより理解されるであろう。

目次 / I大陸の漂移に反対して(ペロウソフ) / II大洋の発展のひとつの仮説(ペロウソフ) / III地球の深部構造の総合研究(ペロウソフ) / IV大陸と大洋のあいだの移行帯の構造とその発展(ペロウソフおよびコスミンスカヤ) / V地溝裂(Georiftogene)とグローバル・テクトニクス(ウディンツェフ) / VI地質学に革命が生じているか(ハイン)

新堀友行編訳 A5判 137ページ 定価980円 発行元 築地書館