



$$v = v_0 a(\text{H}_2\text{O}) \exp[(-E^* + bK)/RT] \dots \dots (2)$$

のように表現される<sup>3)</sup>. ただし,  $a(\text{H}_2\text{O})$  は水の相対湿度,  $K$  応力拡大係数,  $R$  ガス定数,  $T$  絶対温度,  $v_0$ ,  $E^*$ ,  $b$  は定数である. (2)式は造岩鉱物や岩石試料の実験事実を良く説明する.

これまで温度の影響にふれなかつたが, これについて考えてみよう. 沈み込みプレート内温度は, 大陸盾状地や大洋底下に比較すれば相当低いと考えられる. 例えば, 東北日本やマリアナ海溝の沈み込み帯では, 深さ 100 km でも 400°C 以下, 50 km で 200°C 以下の低温先端域の存在が示唆されている<sup>4)</sup>. 一般に岩石は高温高圧下で延性化する. しかし, 沈み込み境界の少なくとも深さ数十 km に相当する温度圧力条件下では, 間隙圧がゼロでも差応力が十分大きければ破壊しうることが実験的に示される. 更に, 蛇紋石のような含水鉱物は適当な温度圧力条件下で脱水反応により水を解放する. その結果, その鉱物を含む岩石の強度は著しく低下し, しかも脆性化する<sup>5)</sup>. 従つて, 含水鉱物を含む岩石がプレートの沈み込みにより地下深所に運ばれ, 漸進的に脱水作用が起これば, 深発地震も破壊により説明される可能性がある<sup>6)</sup>. この考えは同時に地下深部へ水を供給するメカニズムを示唆する点でも興味深い. 岩石の応力腐食は高温度 ( $\leq 400^\circ\text{C}$ ) ほど著しい<sup>7)</sup>.

### 3. 応力腐食が原因とみられる地震例とモデル

1923年9月1日の関東地震は相模湾を震源とし, フィリピン海プレートとアジアプレートの境界である相模トラフ沿いの破壊であるとされている<sup>8)</sup>. この関東地震に先行した異常地震活動に最初に注目したのは今村明恒博士であつた. 彼は 1927 年の論文で, 関東地震に先行した関東地域一帯の地震活動の活発化をもつて, 関東地震の前兆現象であると主張されたのである. しかし, 残念ながらこの主張は広く受け入れられるところとはならなかつた. これには二つの理由があつたと思われる. 一つは, 彼の用いた当時の地震カタログが不完全であつたことである. 例えば, 地震の規模を示すマグニチュードの概念は当時存在せず, 従つてデータの均質性に疑問がもたれたこと. 二つには, 直前の地震活動(前震)ならともかく, 関東地震発生に 10 年も先行した関東地域一帯の広範な地震活動が関東地震の前兆現象であるとする主張は, 当時としては余りにも時代に先んじていたため, 理解が得られなかつたと思われることである.

日本の地震観測業務は気象庁の担当で, 発生時刻, 震源位置, マグニチュードなどは地震カタログとして気象庁から発表されている. 不完全を指摘されていた 1926 年以前のカタログについては, 地震研究所の宇津教授<sup>9)</sup>

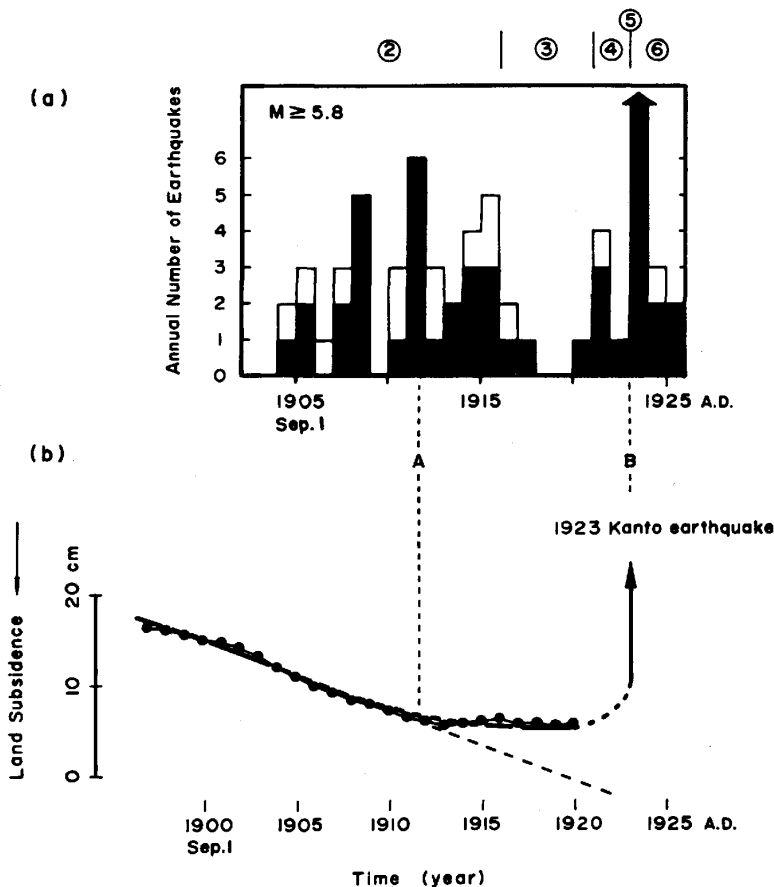


Fig. 1. (a) Plot of annual number of earthquakes against time for the period 1904 to 1926. Five seismic episodes can be distinguished: precursory seismic activity ②, quiescence ③, foreshocks ④, mainshock ⑤ and aftershocks ⑥. (b) Plot of the low-pass filtered sea level data at Aburatsubo against time.

できる限り完全なカタログの作成を目指され、最近これを完成された<sup>9)</sup>。これら最新カタログを用いて、1885年から1982年までの関東地域の地震活動の変遷を調べると、確かに関東地震に先行する異常地震活動が見出される(詳しくは、文献10)を参照されたい)。特に1904年から1926年までの地震活動の時間的変遷を、油壺における年平均潮位の時間変化の長周期成分と比較したのが図1である。潮位の短周期成分は例えば冷水塊の運動のような海流が原因である<sup>11)</sup>が、長周期成分は地殻変動に原因が求められる。図1に示した潮位変化は油壺における地殻変動をあらわすとみてよい。図1によれば、1911年以前には油壺はほぼ一定速度で沈降を続けていたが、それ以後はほぼ定水準で推移した。沈降停止の開始点が先行的地震活動のピーク時期に一致するのが注目される。

この油壺における地殻変動は次のように解釈されよう。沈み込みプレートA(フィリピン海プレート)が陸側プレートB(アジアプレート)とその境界で固着している場合には、プレートAの沈み込みにつれプレートBは下方に引きずられるので、その先端付近は沈降する(図2参照)。油壺における1911年以前の沈降はこの反映である。プレートAの沈み込みが続くと、プレート境界両側でずり変形が進行し、ずり応力が増大する。ずり応力が増大するとやがて応力集中源で局部的破壊が始まる。これが先行的地震活動の開始である(図3のa)。更にプレートAの沈降が続き弾性反発応力が増大すると、応力が固着力に打ち勝ち、プレート境界面上ですべり始める。これが先行的すべりの開始である(図1のA及び図3のb)。1911年以降土地の沈降が停止したのは、こ

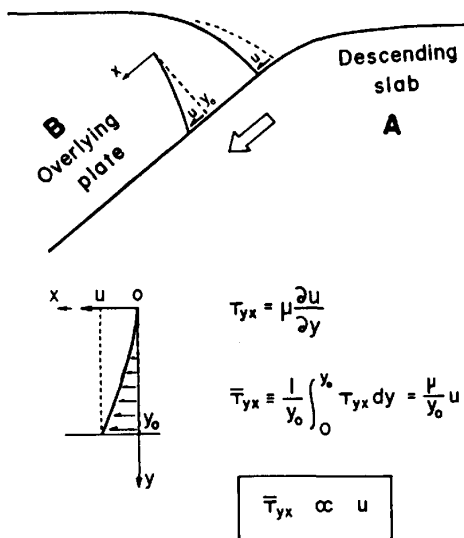


Fig. 2. Sketch showing relation among geometry, stress and motion. An interplate earthquake is generated by elastic rebound motion of the plates. The average shear tectonic stress  $\bar{\tau}_{yx}$  caused by elastic deformation is proportional to the displacement  $u$ , of which the vertical component is sea level change.

の先行すべりのためと考えられる。力学的不安定に先行するこのようなクリープ状安定すべりは、岩石の既存の欠陥面に沿う剪断(すべり)破壊の際にしばしば認められる。剪断応力はすべり変位に比例する(図2)から、沈降の停止はそれまで一定速度で増大していたずり応力が一定レベルに維持されることを意味する。

いつたん応力が一定に保持されると、それまでの応力誘発型の破壊(地震)は起こりえない。間隙圧の変化がなければ、定応力下で可能な破壊は応力集中源である既存断層(あるいはクラック)相互作用による局所的応力の増大か、応力腐食による局所的強度の低下のいずれかによる。断層間相互作用は、もし断層間距離が断層の長さより大きければ、無視できる。それに時間と共に地震発生数が減少するタイプの時間依存性を断層間相互作用で説明することは困難であろう。このことや、既に述べたように、土地の沈降停止の開始点が先行的地震活動のピーク時期に一致すること(図1)などは、応力一定後

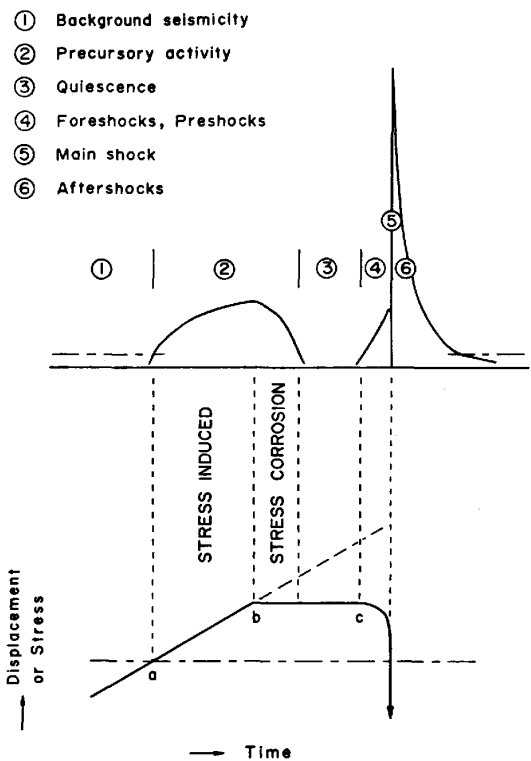


Fig. 3. A schematic diagram showing idealized relation between precursory sequence of seismic activity and premonitory slip for the Kanto earthquake. Precursory activity begins at the point in time a, premonitory slip begins at b, and acceleration of premonitory slip begins at c. Fracture is induced by increasing tectonic stress under stress corrosion during the time interval a to b; time-dependent fracture can occur due to stress corrosion even if the stress is constant. Accelerating premonitory slip on the plate boundary can cause a very rapid increase in local stresses at asperities, resulting in foreshocks.

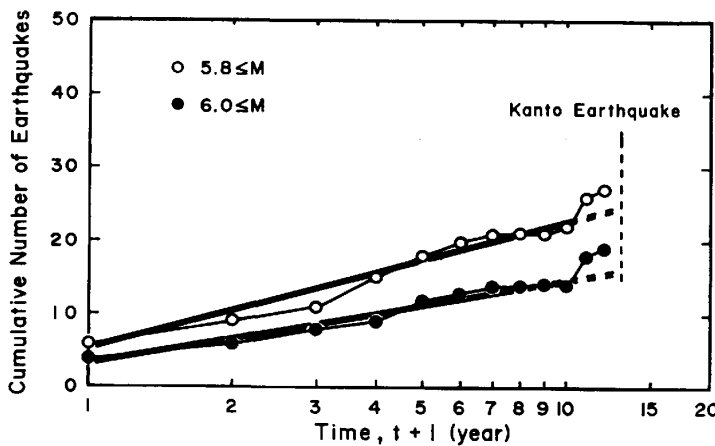


Fig. 4. A semi-log plot of the cumulative number of earthquakes against time.

の地震の発生が応力腐食による遅れ破壊である可能性を強く示唆するものである。

多くの応力集中源を含む岩石に圧縮応力  $\tau$  を加えて一定に保持するとき、局所的な破壊発生率  $n(t)$  は、クラック間相互作用が無視できる場合には、(2)式から

$$n(t) = \frac{N^*RTf(\tau)}{a} \cdot \frac{1}{t+c} \dots\dots\dots (3)$$

のように導ける<sup>12)</sup>。ただし、 $N^*$ 、 $a$ 、 $c$  は定数、 $f(\tau)$  は  $\tau$  の関数、 $t$  は  $\tau$  が一定に保持された時刻からの時間である。(3)式は脆性岩石を用いて得られる実験結果を非常によく説明する。関東地震に先行した地震活動のうち、応力一定後の地震活動が遅れ破壊に帰因するなら、地震発生率は(3)式に従って減少するはずである。実際、図4から地震積算数が  $\log(t+1)$  にほぼ比例することがわかる。

異常地震活動が(3)式に従って時間と共に衰退すると、やがて静穏化する。図1及び3の静穏期③がこれに相当する。本震直前に再び地震活動が活発化するが、これがいわゆる前震④である。このモデル<sup>10)</sup>では、前震はプレート境界面上のすべりの加速に伴うアスペリティ†の破壊に帰される。図3は一連の前兆的地震活動の理想化されたモデルである。

以上、編集委員会の御依頼に応じて、応力腐食と地震の可能な関係について最近の研究の一端を紹介させてい

† プレート境界や既存断層面は全面が一様に接触して等しい強度を持つのではなく、面の凹凸に応じて局所的に強度が異なる。周辺に対して相対的に強度の高い部分は、圧縮応力下で接触面凸部が局所的に強く圧着された部分と考えられるので、アスペリティということがある。

ただいた。この小文が、材料強度ないし破壊研究に従事される方々の関心を地球の破壊現象である地震に向けていただく機縁になれば有難いと思う。

文 献

- 1) E. OROWAN: Geol. Soc. Amer. Mem., 79 (1960), p. 323
- 2) T. A. MICHALSKE and S. W. FREIMAN: Nature, 295 (1982), p. 511
- 3) S. M. WIEDERHORN, S. W. FREIMAN, E. R. FULLER Jr. and C. J. SIMMONS: J. Materials Sci., 17 (1982), p. 3460
- 4) S. HONDA and S. UYEDA: Arc Volcanism: Physics and Tectonics, ed. by D. SIMOZURU and I. YOKOYAMA (1983), p. 117 [TERRAPUB]
- 5) C. B. RALEIGH and M. S. PATERSON: J. Geophys. Res., 70 (1965), p. 3965
- 6) C. B. RALEIGH and W. H. K. LEE: Proc. Andesite Conference, ed. by A. R. MCBIRNEY, Oregon, Dep. Geol. Miner. Ind. Bull., 65 (1969), p. 99
- 7) P. G. MEREDITH and B. K. ATKINSON: Phys. Earth Planet. Inter., submitted
- 8) 金森博雄, 安藤雅孝: 関東大地震 50 周年論文集 (東京大学地震研究所編) (1973), p. 89
- 9) 宇津徳治: 地震研究所彙報, 54 (1979), p. 253; 56 (1981), p. 111; 57 (1982), p. 401
- 10) M. OHNAKA: Pure Appl. Geophys., 122(1984)
- 11) K. TSUMURA: J. Geod. Soc. Japan, 16 (1971), p. 239
- 12) M. OHNAKA: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 20 (1983), p. 121