

談話室

地震と応力腐食

大 中 康 譲*

1. まえがき

物質科学的視点に立つと地震現象はどのように理解されるであろうか。本稿では、1923年9月東京・横浜に未曽有の震災をもたらした関東大地震の先行的異常地震活動に焦点をあてながら、特に材料強度学研究者にとって馴じみの深い応力腐食と地震との関係について述べてみたい。

2. 地震と応力腐食

地震は地殻や上部マントル内に急激な変位が起こり、それによつて生じた弾性波が伝播する現象である。地震の発生機構は、巨視的にみれば、一つの面に沿つて剪断型くいちがい（ずり変位）先端が数 km/s の速度で伝播する現象であることは地震学的解析から明らかにされ、今日広く認められている。このような剪断型くいちがいを引き起こす原因が既存の力学的欠陥面（クラック、断層）に沿う脆性剪断破壊であることは、浅い地震の場合ほとんど疑いをいれない。地球内部の応力状態は、ごく表層を除けば、一般に封圧力下にあり圧縮応力が支配的である。このような条件下の破壊モードが剪断破壊であることは岩石の高圧下の変形破壊実験からも既に確かめられていることである。

ただし、すべての地震が破壊現象であるとはもちろん言えないであろう。地震は地球上どこにでも一様に起ころのではなく、震源の空間分布には地学的に特徴がみられる。例えば、島弧またはそれに準じた構造の地域では、海溝から島弧側に入りこんだ傾斜面（深発地震面と呼ばれる）に沿つて、ほぼ 700 km の深さまで地震が起ることが知られている。このような深発地震は破壊以外のメカニズムによる可能性が残されている。例えば、金属学者 OROWAN¹⁾ は、多結晶金属について知られるリューダース帯の伝播のような塑性変形クリープの不安定が深発地震の原因であるとの仮説を提唱している。しかし、浅い地震の数が圧倒的に多く、しかも地震予知並びに災害科学的見地から重要なのは浅い地震であることから、本稿では地震は破壊であるとの立場で議論をすすめる。

地殻を構成する岩石は異なる鉱物の集合体であり、岩石内部に構成鉱物粒界や割れ目などの力学的欠陥を含むのが一般である。このような岩石の集合体である地殻は、構成鉱物粒径以下 ($\sim 1 \mu\text{m}$) の微視的スケールから数十 km 以上の巨視的スケールに至る様々なサイズの

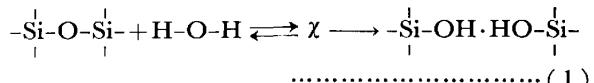
夥しい数の力学的欠陥（クラック、節理、断層など）を含む。更に、一つの既存の断層に注目すれば、断層面は圧縮応力下で接触面の凸部が局所的に強く直接接触し凝着した強度の高い部分と、断層碎屑物（gouge）などを介して相互作用する強度の低い部分、それに間隙部分とに一般に分けられるであろう。従つて、力学的見地からは、地殻は多くの応力集中源を含む不均質構造体として特徴づけられる。

地下深所は、その深さ以浅に被る岩体の重みによつて圧縮を受けている。例えれば、地表から深さ 20 km の地点における封圧力は、静水圧状態を仮定すれば、500 MPa 程度になる。これは間隙が閉じるに十分な圧力である。従つて、もし間隙に何の流体も存在せず、間隙圧がゼロであれば、ほとんどの間隙は閉じてしまうはずである。しかも高封圧下では岩石の破損強度は著しく増大するので、そのような深さで多くの破壊を期待することは困難になろう。しかるに関東地域直下をみると、無感微小地震も含めれば、少なくとも毎日数十の地震が観測されており、20 km 以深の地震も多い。これらの地震が破壊にもとづくとする限り、その説明のためには応力集中源の存在と間隙流体圧の存在を考慮に入れなければ説明がつかない。

間隙流体圧の存在は封圧力下の岩石の破損強度を低下させる。封圧力と間隙流体圧の差を有効圧力と呼ぶが、岩石の破損強度は有効圧力に直接関係し、有効圧力が増すと共に強度も増大する。従つて、もし間隙圧がゼロなら有効圧力は封圧力に等しく、破損強度は封圧力の増大と共に著しく増大することになる。これに対して、高い間隙圧が存在する場合には、たとえ地下深部で封圧力が高くとも、有効圧力は低いで破壊は容易に起こりうる。

間隙流体として考えられるのは水である。地殻を構成する岩石は主としてケイ酸塩鉱物から成るが、水はケイ酸塩鉱物に対して腐食因子として働く。腐食環境下では応力腐食による遅れ破壊が破壊のメカニズムとして重要である。従つて、間隙に水が存在する場合には、応力集中源における腐食の進行が地震活動に重要な役割を果たす可能性がある。

水雰囲気中における岩石の遅れ破壊は、応力集中源であるクラック先端部で H_2O との間で化学反応が進行する結果、クラック先端強度が局部的に低下するためであると考えられている。例えれば、典型的なケイ酸塩鉱物であるシリカの場合、結合力の強い Si-O 結合は H_2O と



のように反応して、結合力の弱い水素結合に置換される²⁾。ただし、 χ は活性体を意味する。この場合のクラック伝播速度 v は化学反応速度に支配され、反応速度論的考察から

* 東京大学地震研究所 助教授 理博

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

のようによく表現される³⁾。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⁴⁾。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⁵⁾。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⁶⁾。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⁷⁾。

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⁸⁾。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⁹⁾

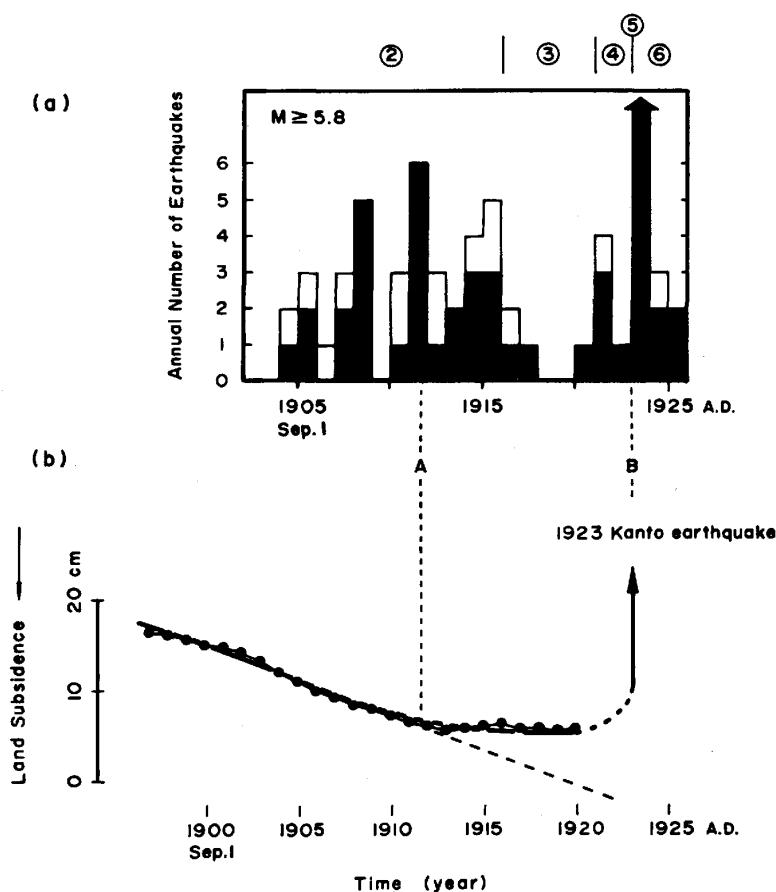


Fig. 1. (a) Plot of annual number of earthquakes against time for the period 1904 to 1926. Five seismic episodes can be distinguished: precursory seismic activity ②, quiescence ③, foreshocks ④, mainshock ⑤ and aftershocks ⑥. (b) Plot of the low-pass filtered sea level data at Aburatsubo against time.

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⁹⁾。これら最新のカタログを用いて、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れば冷水塊の運動のような海流が原因である¹¹⁾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所的破壊が始まる。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の沈降が続き弹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

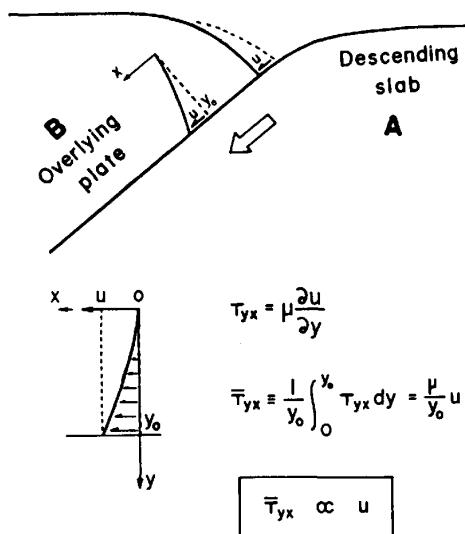


Fig. 2. Sketch showing relation among geometry, stress and motion. An interplate earthquake is generated by elastic rebound motion of the plates. The average shear tectonic stress \bar{T}_{yx} caused by elastic deformation is proportional to the displacement u , of which the vertical component is sea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

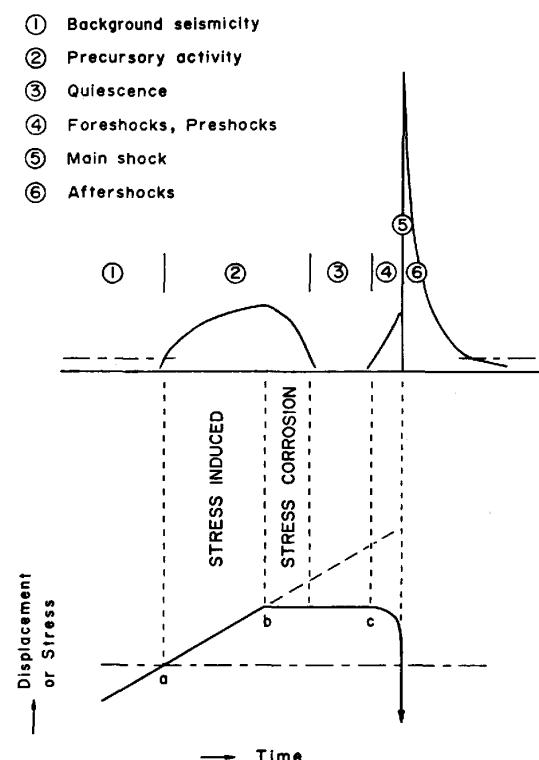


Fig. 3. A schematic diagram showing idealized relation between precursor sequence of seismic activity and premonitory slip for the Kanto earthquake. Precursory activity begins at the point in time a, premonitory slip begins at b, and acceleration of premonitory slip begins at c. Fracture is induced by 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.

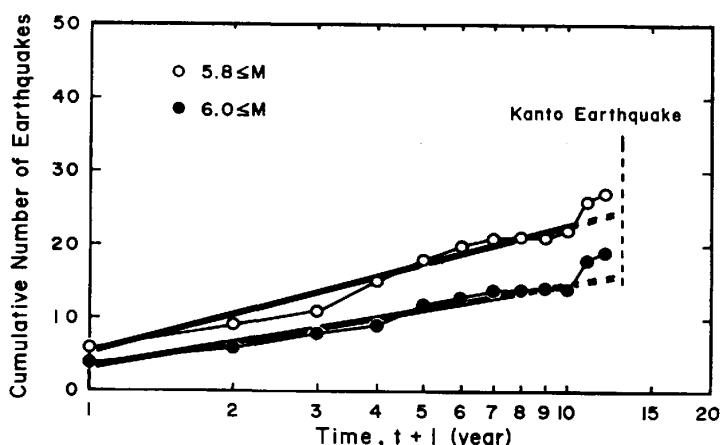


Fig. 4. A semi-log plot of the cumulative number of earthquakes against time.

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 τ 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

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

のように導ける¹²⁾。ただし、 N^* 、 a 、 c は定数、 $f(\tau)$ は τ の関数、 t は τ 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)式に従つ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)式に従つ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¹⁰⁾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樣に接觸して等しい強度を持つのではなく、面の凹凸に応じて局的に強度が異なる。周辺に対して相対的に強度の高い部分は、圧縮応力下で接觸面凸部が局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させ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. MICHALSKY 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